



MODELAÇÃO NUMÉRICA DE UM DISPOSITIVO PONTUAL DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA DAS ONDAS

Afonso Maria Prates Acciaioli Ribeiro da Silva

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Luís Miguel Chagas da Costa Gil

Janeiro de 2014

Copyright

A Faculdade de Ciências e tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Ao Professor Luís Gil por todo o apoio que me deu no desenvolvimento deste trabalho, mesmo em momentos onde o tempo era um recurso escasso. Mostrou sempre interesse, disponibilidade tendo dado conselhos fundamentais para a elaboração do trabalho.

Agradeço à minha família, por me ter apoiado em todos os aspectos ao longo deste percurso e ao ter proporcionado todas as condições necessárias, assim como toda a confiança que sempre depositaram em mim.

Ao Centro de Energia das Ondas, pela utilização com fins educacionais do programa *WAMIT* e especialmente ao Eng.º Marco Alves, Coordenador da área da Modelação Numérica, que se mostrou sempre disponível para me apoiar.

Ao Rui Gomes, do IST, não só pela informação que me disponibilizou, como o tempo despendido.

Ao Professor João Cardoso que me apoiou na construção dos códigos em *MATLAB*.

Aos meus colegas da universidade que sempre me ajudaram quando precisei, tanto a nível técnico como emocional, especialmente o Hugo, o Pedro, o Diogo, o Miguel e o Salvador.

Por último, aos meus amigos de longa data que estiveram presentes nos momentos mais importantes desta minha jornada, nomeadamente o José, o Francisco, e o André.

Resumo

Os sistemas de aproveitamento de energia das ondas do tipo absorção pontual contêm um flutuador de pequena dimensão quando comparada com o comprimento da onda incidente. A descrição precisa do movimento é crucial no projecto e concepção deste tipo de sistemas, sendo o comportamento ressonante fundamental para um funcionamento para o requerido rendimento energético.

O principal objectivo desta dissertação é o desenvolvimento de uma ferramenta numérica, que integre a simulação hidrodinâmica com o modelo do sistema de extracção (*power take-off-PTO*). A ferramenta é constituída três programas: um de geração de malha, o *WAMIT* para a modelação hidrodinâmica linear e *software* desenvolvido em *MATLAB* que integra o *PTO*. Após um processo de validação, estuda-se a influência da massa, das dimensões, da forma do flutuador e das características dissipativas e elásticas do sistema de *PTO*.

Numa primeira fase, adopta-se um modelo numérico do *PTO* cujos parâmetros variam com a frequência da excitação, permitindo alcançar as condições óptimas. Como na prática é tecnologicamente complexo construir um mecanismo de *PTO* capaz de alterar os seus coeficientes elásticos e de amortecimento em função da frequência da excitação, estudam-se sistemas sem componente elástica e com componente dissipativa dependente e independente da frequência. Conclui-se que na prática não se justifica a construção de um mecanismo de *PTO* com amortecimento adaptável à frequência da excitação.

Por fim, dimensiona-se um flutuador capaz de ter um comportamento ressonante quando sujeito a um estado de mar típico, concluindo-se que este objectivo é apenas concretizado para massas muito elevadas.

Palavras-chave: Absorção pontual, *WAMIT*, *Power take-off*, Corpos Flutuantes, Comportamento ressonante.

Abstract

Point Absorber systems for exploitation of wave energy contain a small floater compared with the length of the incident wave. A precise description of motion is crucial for the project and design of such systems, being the resonant behavior fundamental for running at the required energy efficiency.

The main objective of this thesis is the development of a numerical tool that integrates the hydrodynamic simulation with the model of the extraction system (power take-off - *PTO*). The tool consists of three programs: one for mesh generation, the *WAMIT* for linear hydrodynamic modeling and software developed in *MATLAB* that integrates the *PTO*. After a validation process, the influence of the weight, size, and shape of the float, dissipative and elastic characteristics of the *PTO* system are studied.

Initially, adopting a numerical model of the *PTO* whose parameters vary with the frequency of excitation, allowing you to reach the optimal conditions. Since in practice it is technologically complex to build a *PTO* mechanism capable of changing its elastic and damping coefficients depending on the frequency of excitation, we study systems without elastic component and frequency dependent and independent the dissipative component. We conclude that in practice, the construction of a mechanism *PTO* with adaptive frequency excitation damping is difficult to justify.

Finally, a floater able to have a resonant behavior when subjected to a typical state of the sea is dimensioned, concluding that this objective is achieved only with very high masses.

Keywords: Point Absorption, *WAMIT*, Power take-off, Floating Bodies, Resonant behavior.

Índice

Índice de Figuras	XIII
Índice de Tabelas	XV
Lista de Símbolos, Siglas ou Abreviaturas	XVII
1. Introdução	1
1.1 Contextualização do Problema	1
1.2 Descrição do Dispositivo de Aproveitamento de Energia das Ondas	3
1.3 Metodologia	5
1.4 Objectivos da Dissertação	6
1.5 Estrutura da Dissertação	7
2 Estudo Bibliográfico	8
2.1 Recurso Energético das Ondas Marítimas	8
2.2.1 Tipos de Dispositivos de Aproveitamento de Energia das Ondas	9
2.2 Teoria Linear das Ondas	11
2.3 O Problema de Radiação/Difracção e a Absorção de Energia	13
2.4 Modelação Matemática de um Corpo Flutuante no Domínio da Frequência	15
2.4.1 Equação de Laplace e Condições de fronteira	15
2.4.2 Decomposição do Potencial e Problemas de Radiação e Difracção	16
2.4.3 Forças Hidrodinâmicas	17
2.4.4 Equações do Movimento	19
2.5 Equação do Movimento com Sistema de <i>PTO</i> com um Grau de Liberdade (arfagem)	21
2.5.1 Condições de Absorção Óptimas	23
2.5.2 Equações da Potência	23
3 Modelação Numérica	25
3.1 Descrição	25
3.2 WAMIT	25
3.2.1 Descrição	26
3.2.2 Ficheiros de entrada	26
3.2.3 Ficheiros de Saída	32
3.4 Ferramentas desenvolvidas em <i>MATLAB</i>	34
4 Testes de Validação de Procedimentos	36
4.1 Descrição do Caso de Teste	36
4.2 Coeficientes de Massa Adicionada	39
4.3 Coeficientes de Amortecimento	41
4.4 Coeficientes da Força de Excitação	43

4.4.1	Módulo da Força de Excitação	43
4.4.2	Fase entre a Força de Excitação e a Amplitude da Onda Incidente	45
4.5	Factor de Amplificação Dinâmica	46
4.5.1	Módulo do Factor de Amplificação Dinâmica	46
4.5.2	Fase entre o Factor de Amplificação Dinâmica e Amplitude da onda Incidente	49
5	Resultados Numéricos	51
5.1	Caracterização do Estado de Mar	51
5.2	Influência da Massa	53
5.3	Influência do Diâmetro.....	55
5.4	Sistema em arfagem com <i>PTO</i>	56
6	Conclusões e Desenvolvimento Futuro	64
	Bibliografia	66

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Classificação dos recursos energéticos [2].	1
Figura 1.2 - Recursos renováveis (*Gradiente térmico dos oceanos).	2
Figura 1.3 - Dispositivo em desenvolvimento com a respectiva legenda dos diferentes componentes.	3
Figura 1.4 – Metodologia adoptada para o desenvolvimento da dissertação de mestrado.	5
Figura 2.1 - Distribuição global de energia das ondas em kW/m de comprimento de onda [3].	8
Figura 2.2 – Esquema representativo de um dispositivo de coluna de água oscilante (CAO) [5].	9
Figura 2.3 – Protótipo <i>WaveDragon</i> [5].	10
Figura 2.4 – Dispositivo <i>Archimedes Wave Swing</i> (AWS) [7].	10
Figura 2.5 – Dispositivo <i>Point Absorber Wave Energy</i> [3].	11
Figura 2.6 - Sobreposição dos problemas de difracção e de radiação [9].	13
Figura 2.7 – a. Onda não perturbada; b. Ondas (simétricas) radiadas pelos corpos flutuantes oscilando verticalmente (em água calma); c. Ondas (anti-simétricas) geradas pelos corpos flutuantes oscilando verticalmente (em água calma); d. Sobreposição (soma) das três ondas acima e consequente absorção completa da energia da onda incidente [10].	14
Figura 2.8 - Nomenclatura utilizada para definir os graus de liberdade.	15
Figura 2.9 – Sistema flutuante equivalente [10].	22
Figura 2.10 - Sistema com <i>PTO</i> equivalente.	22
Figura 3.1 – Descrição da Ferramenta.	25
Figura 3.2 – Esquema dos ficheiros de entrada.	26
Figura 3.3 – Discretização de um cilindro mostrando a convenção da numeração dos vértices de cada painel, [13].	31
Figura 3.4 – Ficheiros de saída.	32
Figura 3.5 – Geometria do flutuador do dispositivo e respectivo sistema de eixos coordenados.	33
Figura 3.6 – Escolha da geometria da superfície a discretizar.	33
Figura 3.7 – Variáveis a introduzir para discretizar superfícies cilíndricas.	34
Figura 3.8 – Variáveis a introduzir para discretizar superfícies semiesféricas ou circulares num plano horizontal.	34
Figura 4.1 – Representação das malhas utilizadas: a) em [14]; b) pelo autor.	37
Figura 4.2 – Coeficiente de massa adicionada adimensional para os modos: a) 11 (A_{11}^*); b) 15 (A_{15}^*); c) 33 (A_{33}^*); d) 55 (A_{55}^*).	39
Figura 4.3 – Coeficiente de amortecimento adimensional para os modos: a) 11 (D_{11}^*); b) 15 (D_{15}^*); c) 33 (D_{33}^*) e d) 55 (D_{55}^*).	41
Figura 4.4 – Coeficiente do módulo da força de excitação adimensional para os modos: a) 1 (F_1^E); b) 3 (F_3^E) e c) (F_5^E).	43
Figura 4.5 – Fase entre a força de excitação e a amplitude da onda incidente, em graus, para os modos: a) 1 (φ_1^*); b) 3 (φ_3^*) e c) (φ_5^*).	45
Figura 4.6 – Factor de amplificação dinâmica para os modos: a) 1 (FAD_1^*); b) 3 (FAD_3^*) e c) (FAD_5^*).	46
Figura 4.7 – Fase entre a resposta e a onda incidente para os modos: a) 1 (θ_1); b) 3 (θ_3) e c) 5 (θ_5).	49
Figura 5.1 – Frequência de oscilação natural em função do calado.	54
Figura 5.2 - Frequência de oscilação natural em função do diâmetro do flutuador.	55
Figura 5.3 – Potência absorvida adimensional em função da frequência de oscilação para os casos 1, 2 e 3. Flutuadores: a) D=38 e H=10; b) D=38 e H=12; c) D=40 e H=8; d) D=40 e H=10.	58

Figura 5.4 – Potência absorvida adimensional em função da frequência de oscilação para os casos 1, 2 e 3. Flutuadores: a) $D=40$ e $H=12$; b) $D=42$ e $H=8$; c) $D=42$ e $H=10$; d) $D=42$ e $H=12$	59
Figura 5.5 - Potência absorvida adimensional em função da frequência de oscilação para os casos 1, 2 e 3. Flutuadores: a) $D=44$ e $H=8$; b) $D=44$ e $H=10$; c) $D=44$ e $H=12$	60
Figura 5.6 - Potência absorvida adimensional em função da frequência de oscilação para os casos 1, 2 e 3 com flutuador de $D=4$ e $H=2$	61
Figura 5.7 - Potência absorvida em função da frequência de oscilação para o caso 3 com flutuador de $D=4$ e $H=2$	62

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Estrutura do Ficheiro de controlo do Potencial com os nomes das variáveis.	27
Tabela 2 – Estrutura do Ficheiro de controlo das Forças com os nomes das variáveis.	28
Tabela 3 – Estrutura do Ficheiro de Configuração.	29
Tabela 4 – Estrutura do Ficheiro de Dados Geométricos.	31
Tabela 5 – Formato do ficheiro de saída.	32
Tabela 6 – Densidade da probabilidade para diferentes estados do mar [16].	51
Tabela 7 – Fluxo de energia existente para diferentes estados do mar em kw/m.	52
Tabela 8 – Indicador da potência associada ao estado de mar.	52
Tabela 9 – Condições para o cálculo da potência absorvida.	57
Tabela 10 – Frequência de pico, massa adicionada, coeficiente de amortecimento, força de excitação, resposta de amplitude e potências de excitação, radiada e absorvida.	63

Lista de Símbolos, Siglas ou Abreviaturas

Símbolos Romanos

A - Amplitude da onda

A_{ij} - Coeficiente de massa adicionada para o modo ij

A_{ij}^* - Coeficiente de massa adicionada adimensional para o modo ij

C_{ij} - Coeficiente de restituição para o modo ij

D_{ij} - Coeficiente de amortecimento para o modo ij

D_{ij}^* - Coeficiente de amortecimento adimensional para o modo ij

D_{pto} - Coeficiente de amortecimento provocado pelo mecanismo de extracção de potência

C - Velocidade de propagação de onda (Celeridade)

D - Diâmetro do flutuador

F - Fluxo de energia por metro de crista de onda

FAD_i^* - Factor de amplificação dinâmica para o modo ij

F_i^E - Força de excitação para o modo ij

F_i^{E*} - Força de excitação adimensional para o modo ij

F_i^R - Força de radiação para o modo ij

F^H - Força de hidrostática

F_{ij}^{FK} - Força de *Froude-Kirlov*

g - Aceleração da gravidade

H - Altura da parte cilíndrica do flutuador

h - Profundidade

k - Número de onda

L - Calado do flutuador

P_A - Potência de absorção

P_E - Potência de excitação

P_R - Potência de radiação

p - Pressão

T - Período de onda

u - Velocidade segundo x

U_n – Superfície do corpo flutuante

w - Velocidade segundo z

x - Coordenada segundo o eixo x (abscissa)

y - Coordenada segundo o eixo y (ordenada)

z - Coordenada segundo o eixo z (cota)

Símbolos Gregos

ζ_i - Amplitude na direcção z para o modo i

$\dot{\zeta}_i$ - Velocidade na direcção z para o modo i

$\ddot{\zeta}_i$ - Aceleração na direcção z para o modo i

η - Superfície Livre

ρ - Densidade do fluido

λ - Comprimento de onda

ω - Frequência de oscilação

ω_0 - Frequência de oscilação Natural

ω^* - Frequência de oscilação Adimensional

θ_i - Fase entre a resposta e a onda incidente

ϕ - Módulo do potencial complexo

ϕ^I - Módulo do potencial complexo incidente

ϕ^P - Módulo do potencial complexo de perturbação

ϕ^R - Módulo do potencial complexo de radiação

Φ - Função potencial de velocidades

φ_i^* - Fase entre a força de excitação e a amplitude da onda incidente

Siglas

AWS – *Arquimedes Wave System*

CAO – Coluna de Água Oscilante

PTO - Power Take-Off

WAMIT - Wave Analasys of Massachusets Institute of Technology

Abreviaturas

MATLAB - Matrix Laboratory

1. Introdução

Neste capítulo apresentam-se os diferentes tipos de recursos energéticos e recorda-se a importância dos recursos renováveis como alternativa à escassez do petróleo. De seguida, é explicada a metodologia seguida nesta dissertação.

Por último, é feita a apresentação pormenorizada do dispositivo em estudo utilizado para aproveitamento de energia das ondas e dos objectivos desta dissertação.

1.1 Contextualização do Problema

Existe uma forte correlação entre o desenvolvimento da sociedade e a energia consumida [1]. Como é de esperar, todos os países procuram uma sociedade mais desenvolvida e, consequentemente, o consumo de energia mundial tem vindo a aumentar. Os recursos energéticos podem ser classificados em primários (obtidos directamente da natureza) ou secundários. Podem também ser classificados por renováveis (cuja exploração não excede a produção) e não-renováveis. A figura 1.1 descreve a classificação destes recursos energéticos:

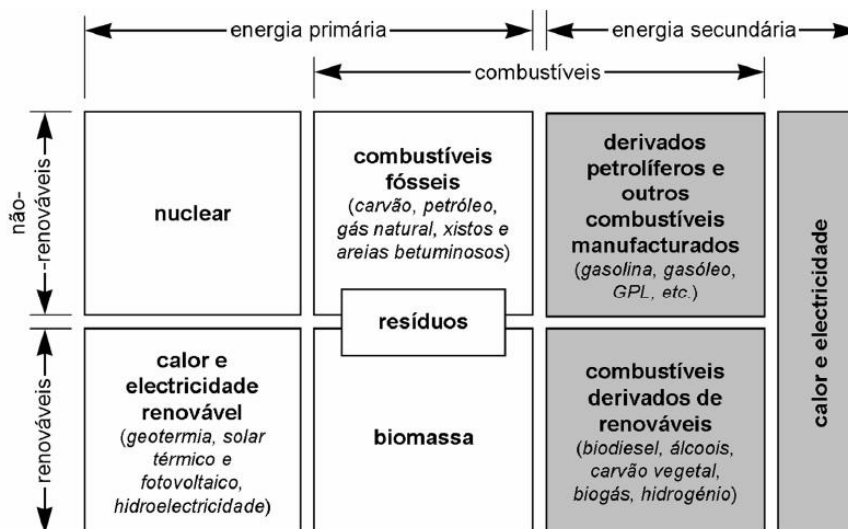


Figura 1.1 - Classificação dos recursos energéticos [2].

Grande parte destes recursos (83% em 2009 [1]) são combustíveis fósseis e as previsões, a curto prazo, não indicam nenhuma mudança significativa na dependência desta fonte. Estimativas optimistas indicam que reservas de petróleo e gás natural irão esgotar-se ainda antes do fim deste século [1].

Naturalmente, as emissões de dióxido de carbono e outros gases, provocadas pela produção de energia através de combustíveis fósseis, têm também vindo a aumentar. Por consequência, a temperatura média global subiu desde a revolução industrial acarretando alterações climáticas designadas por aquecimento global [1].

Tal como referido anteriormente, a escassez do petróleo e consequente aumento dos seus preços, a crescente preocupação com o aquecimento global e o aumento da consciência pública sobre o impacto ambiental provocado pelas tecnologias convencionais dos combustíveis fósseis são factores que têm, nos últimos anos, estimulado o desenvolvimento das tecnologias alternativas baseadas em recursos renováveis [1].

Os recursos renováveis podem-se classificar como recursos provenientes, ou não, da energia inicialmente irradiada pelo Sol sobre a Terra. Na figura 1.2 são apresentados os principais recursos renováveis.

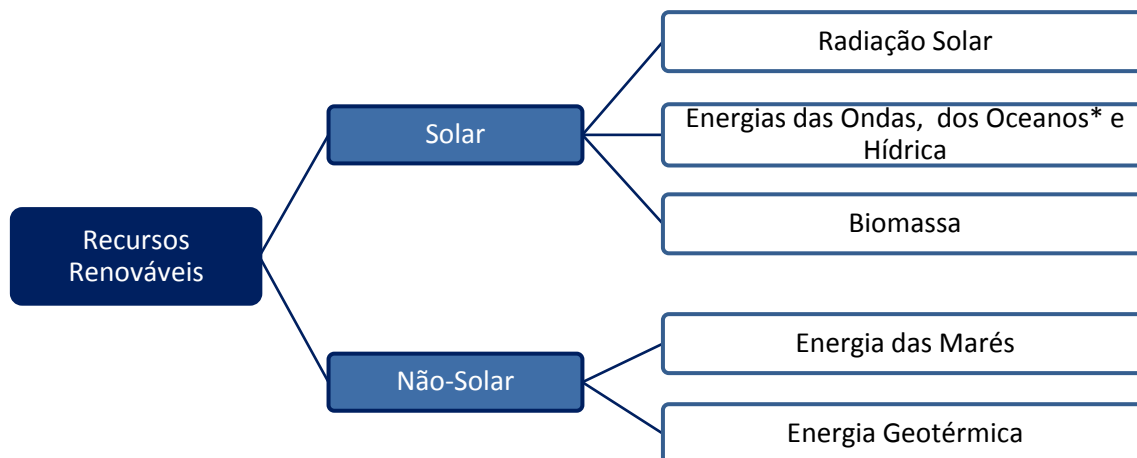


Figura 1.2 - Recursos renováveis (*Gradiente térmico dos oceanos).

A opção por energias renováveis assume no contexto português especial relevância, não só pela vertente ambiental como pela económica pois, a exploração dos recursos renováveis (nomeadamente vento e ondas) permite reduzir as importações combustíveis fósseis e assim a dependência externa do país. Esta redução na dependência externa, provocada pela exploração de um recurso nacional, pode ser ampliada desde que seja implementada uma estratégia de desenvolvimento e produção da tecnologia necessária à extracção energética. Se tal, não for implementado o país ver-se-á na necessidade de importar essa tecnologia e assim reduzir, num menor grau, as suas importações.

1.2 Descrição do Dispositivo de Aproveitamento de Energia das Ondas

O dispositivo de aproveitamento de energia das ondas em estudo é composto por um flutuador guiado, que lhe permite quase exclusivamente o movimento vertical. O flutuador está ligado a uma bomba de êmbolo que alimenta um sistema hidráulico. Esta ideia foi inicialmente desenvolvida pelo Eng.^o Cesário Fonseca.

A inovação deste dispositivo traduz-se na introdução de um reservatório pressurizado que permite estabilizar o funcionamento de uma turbina tipo Pelton. Este reservatório filtra as oscilações de pressão e de caudal decorrentes do funcionamento cíclico da bomba de êmbolo, garantindo condições de funcionamento estáveis à turbina e ao alternador. O circuito hidráulico possui um conjunto de válvulas de retenção que lhe permite funcionar como dispositivo fechado e utilizar água doce, evitando os efeitos corrosivos da água salgada.

Uma vez que a concepção do dispositivo permite apenas extrair energia durante os movimentos ascendentes do flutuador, tem de existir um sistema de controlo de tensão do cabo. Na figura 1.4 é apresentado um esquema do dispositivo em estudo, com a enumeração dos respectivos componentes, preso ao fundo do mar e sujeito à excitação das ondas. Seguidamente descreve-se o funcionamento cíclico do dispositivo de forma mais pormenorizada.

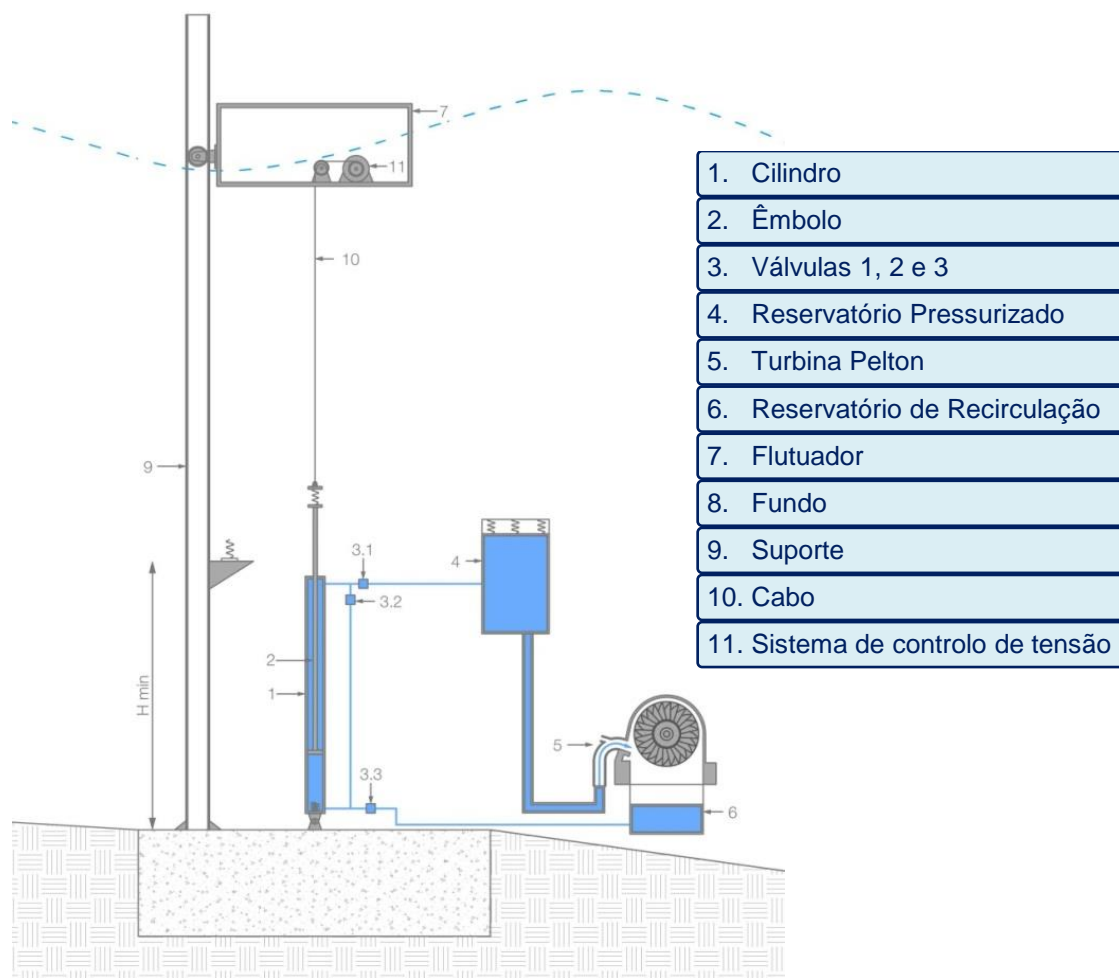


Figura 1.3 - Dispositivo em desenvolvimento com a respectiva legenda dos diferentes componentes.

Quando o flutuador inicia um movimento ascendente, o sistema de controlo de tensão não permite que o cabo se desenrole provocando a subida do êmbolo da bomba volumétrica. As válvulas 1 e 3 encontram-se abertas e a 2 fechada. Deste modo, o circuito hidropneumático em funcionamento é o maior, ou seja, a água movimenta-se do cilindro para o reservatório pressurizado, passando pela válvula 1, e do reservatório para turbina, gerando energia.

Quando o flutuador inicia um movimento descendente, não é possível extrair energia, e o sistema de controlo de tensão recolhe o cabo. O êmbolo, sob a acção da força da gravidade juntamente com uma força provocada por um mecanismo elástico, localizado entre o cabo e o cilindro, inicia também um movimento descendente. Nesta situação, as válvulas 1 e 3 encontram-se fechadas e a 2 aberta. O circuito hidropneumático em funcionamento é o menor e o dispositivo não extrai energia.

Quando o flutuador efectua um movimento ascendente a força de impulsão terá de ser capaz de vencer as forças do sistema elástico, do peso e de inércia do flutuador e do cilindro, só assim começará a produzir energia.

No capítulo 3, é proposta uma alteração ao sistema idealizado pelo inventor com o objectivo de o linearizar tornando idênticas as características do sistema durante os movimentos ascendentes e descendentes.

1.3 Metodologia

A metodologia adoptada no âmbito desta dissertação dividiu-se em quatro etapas, tal como se pode verificar na figura 1.3.

A primeira etapa, iniciou-se com um estudo bibliográfico caracterizando o recurso da energia das ondas e os diferentes tipos de tecnologias e dispositivos existentes. De seguida, abordou-se as teorias matemáticas de propagação de ondas marítimas. Descrita a excitação, foi necessário escolher um modelo matemático que descrevesse a resposta de um corpo flutuante livre ou integrante de um sistema de extracção sob a acção de ondas marítimas.

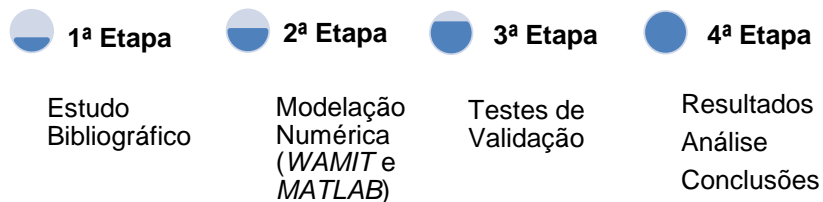


Figura 1.4 – Metodologia adoptada para o desenvolvimento da dissertação de mestrado.

Na segunda etapa, para resolver as equações diferenciais que traduzem o comportamento de um corpo flutuante, foi necessário utilizar um modelo numérico. A modelação foi efectuada recorrendo ao código comercial *WAMIT*. O tratamento de resultados e a introdução de um mecanismo de extracção de energia foram efectuados recorrendo a programas desenvolvidos pelo autor em *MATLAB*.

Desenvolvida a ferramenta numérica (*WAMIT* e *software* em *MATLAB*), na terceira etapa, esta foi validada recorrendo a resultados publicados por outros autores.

Validado o procedimento, na última etapa, foi analisada a influência da massa e dimensões do flutuador na energia extraída. Desta forma, foi desenvolvida uma metodologia de projecto que permite otimizar o corpo flutuante para os estados do mar da região onde vai operar. A realização de várias simulações numéricas permitiu após uma análise criteriosa dos resultados retirar conclusões.

1.4 Objectivos da Dissertação

Este trabalho pretende contribuir para o desenvolvimento de uma tecnologia específica de extracção de energia das ondas.

O principal objectivo desta dissertação é o desenvolvimento de uma ferramenta numérica que permita dimensionar sistemas de extracção de energia, por forma a maximizar a energia absorvida. Validada esta ferramenta é possível estudar a influência da massa, das dimensões e da forma do flutuador e das características dissipativas e elásticas do sistema de *power take-off*.

Para atingir este objectivo foi necessário utilizar um complexo *software* de modelação numérica, o *WAMIT*, e desenvolver programas em *MATLAB* de tratamento de dados e de simulação dum sistema de extracção de energia a acoplar ao flutuador.

Este facto possibilitou ao autor atingir objectivos pessoais que lhe permitiram rectificar deficiências formativas enquanto aluno, nomeadamente na simulação numérica e na programação de nível científico.

1.5 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação desenvolve-se em seis capítulos:

- **Capítulo 1** – O problema em estudo é apresentado, assim como a metodologia a utilizar e os objectivos da dissertação;
- **Capítulo 2** – Este capítulo inicia-se com um estudo bibliográfico sobre a energia das ondas marítimas e respectivas tecnologias de extracção. Seguidamente caracteriza-se agitação marítima do ponto de vista matemático, apresentando-se as equações relevantes da teoria linear das ondas. Caracterizada a excitação, resume-se o modelo matemático do movimento de um corpo flutuante. Por fim, modela-se o sistema de extracção de energia (*power take-off*);
- **Capítulo 3** – Apresenta-se o modelo numérico desenvolvido pelo autor dando especial relevo às interacções entre as suas componentes. Assim, descreve-se do ponto de vista do utilizador o *software WAMIT*. O código de geração de malha programado em *PYTHON* é apresentado, bem como os programas complementares desenvolvidos em *MATLAB*;
- **Capítulo 4** – Neste capítulo, valida-se o modelo numérico desenvolvido (*WAMIT* e *MATLAB*) recorrendo a comparações dos resultados obtidos com resultados publicados;
- **Capítulo 5** – Aplica-se o modelo desenvolvido na optimização de extracção de energia discutindo os resultados;
- **Capítulo 6** – No último capítulo são apresentadas as principais conclusões e são traçadas possíveis direcções a seguir em trabalhos futuros.

2 Estudo Bibliográfico

Neste capítulo, descreve-se o recurso energético das ondas marítimas, são apresentados os diferentes tipos de dispositivos de extracção bem como os critérios para a sua classificação.

Seguidamente apresenta-se o modelo linear das ondas. Optou-se por este modelo simples por ser suficiente para identificar as variáveis mais relevantes deste fenómeno.

Posteriormente expõem-se a abordagem clássica do “problema de difracção radiação para os corpos flutuantes”, adaptando-se as equações gerais ao dispositivo de extracção em estudo neste trabalho. Por fim, descreve-se o modelo analítico utilizado, que permite calcular a energia extraída pelo dispositivo de *power take-off*.

2.1 Recurso Energético das Ondas Marítimas

Entre os diferentes tipos de ondas do mar, as ondas geradas pelo vento são aquelas que têm a maior concentração energética. O vento, essencialmente provocado pelos gradientes térmicos e de pressão induzidos pela radiação solar, interage com a superfície da água nos oceanos, mares e até rios, gerando ondas de superfície que podem transportar conteúdos energéticos importantes. A constante rotação da Terra e a influência gravitacional da Lua nas marés provocam correntes que também criam ondas de mar.

A potência da onda é proporcional ao quadrado da altura significativa e do período médio do movimento. As ondas de curto período (7-10 s) e de grande amplitude (da ordem de 2 m) têm fluxos de energia superior a 40-50 kW por metro de frente de onda. Tal como a maioria dos recursos renováveis, a energia das ondas é desigualmente distribuída ao longo do globo. Na figura 2.1 representa-se a distribuição global deste recurso.

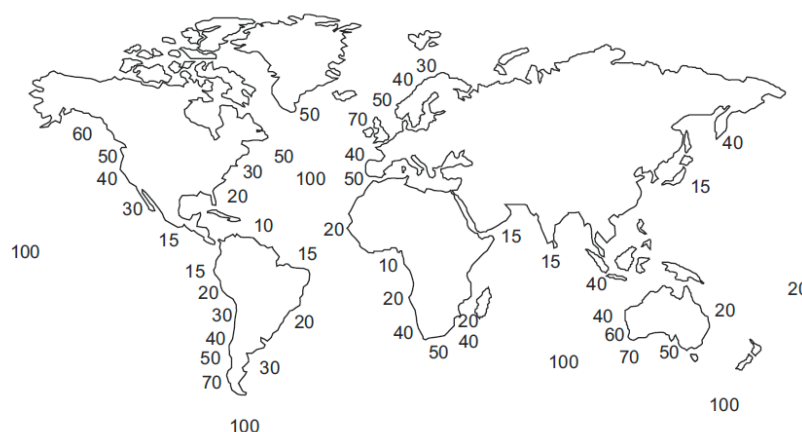


Figura 2.1 - Distribuição global de energia das ondas em kW/m de comprimento de onda [3].

Não obstante este importante recurso há factores que dificultam o desenvolvimento de dispositivos de aproveitamento desta energia tais como [3]:

- Irregularidade na amplitude, fase e direcção das ondas, o que dificulta a eficiência máxima do dispositivo;
- Condições meteorológicas extremas, onde as forças a que estas estruturas ficam sujeitas podem atingir valores 100 vezes maiores que o nominal;

- A gama de frequências das ondas (0,1 Hz) é 500 vezes mais pequena que a frequência utilizada em geradores eléctricos.

2.2.1 Tipos de Dispositivos de Aproveitamento de Energia das Ondas

Quanto menor a distância da costa, menor a quantidade de energia transportada pelas ondas devido à dissipação no fundo. Assim, há dois factores contraditórios a conciliar: a proximidade à costa facilita transporte da energia e a fixação, manutenção e operação do sistema mas o recurso energético é mais pobre.

A distância à costa aparece assim como critério de classificação dos dispositivos, mas esta distância não é independente da profundidade. Desta forma, muitos autores preferem classificar os dispositivos em função da profundidade do local onde são implantados.

Seguidamente são apresentados apenas alguns tipos de dispositivos, podendo encontrar-se um trabalho exaustivo em [4] e [5].

a) Dispositivos Shoreline

Os dispositivos *shoreline*, como o próprio nome indica são fixos ou embutidos no litoral, tendo como vantagem a facilidade de instalação e manutenção. Além disso, não exigem a existência de ancoragem como nas águas profundas ou grandes comprimentos de cabo eléctrico submarino. No entanto, são muito menos eficientes [3] e a sua implantação pode estar limitada pelas exigências geológicas da costa, amplitude da maré, preservação da paisagem costeira, etc.

Os dispositivos de coluna de água oscilante (CAO) são dispositivos *shoreline* constituídos por uma estrutura oca, parcialmente submersa, com uma abertura abaixo da linha de água, direccionada o fundo do mar.

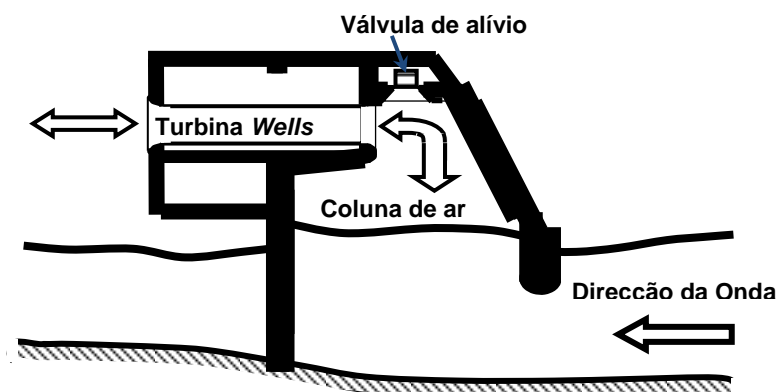


Figura 2.2 – Esquema representativo de um dispositivo de coluna de água oscilante (CAO) [5].

O movimento da superfície do mar pressuriza e despressuriza, alternadamente, o ar dentro da estrutura e cria um fluxo de ar na turbina. Estes dispositivos utilizam turbinas do tipo *Wells*, capazes de manter o mesmo sentido de rotação, independentemente da orientação do fluxo do ar. Ou seja, esta turbina permite a geração de energia quando o nível da água sobe e quando o nível da água desce. A turbina está protegida por uma válvula de fecho rápido que evita que a água a possa atravessar em situações de grande agitação dentro da câmara. Na Ilha do Pico, Açores, existe um dispositivo de CAO, a central piloto europeia (400 kW) [3].

b) Dispositivos Nearshore

Os dispositivos *Nearshore* (perto da costa) são situados em águas pouco profundas, até 20m. O *WaveDragon* trata-se de um dispositivo de galgamento flutuante. A água é acumulada num reservatório sobrelevado relativamente ao nível médio da superfície livre do mar depois de galgar a estrutura. A água é devolvida ao mar fluindo através de turbinas hidráulicas de baixa queda (tipo *Kaplan*) que accionam geradores eléctricos. Ao longo da costa da Dinamarca encontra-se um protótipo ligado à rede.



Figura 2.3 – Protótipo *WaveDragon* [5].

Trata-se de uma central piloto de 20 kW de potência máxima que está a funcionar numa zona marítima no mar do Norte, com uma profundidade de 6m.

c) Dispositivos Offshore

Os dispositivos *offshore*, ancorados em águas profundas (mais de 40m) [3], estão sujeitos a ondas de maior conteúdo energético e têm sofrido alterações, tendo actualmente menores dimensões mas maior eficiência.

O *Archimedes Wave Swing* é um dispositivo *offshore* que consiste numa estrutura pressurizada submersa, na qual a parte superior se encontra sujeita a movimentos verticais provocados por mudanças periódicas de pressão hidrostática. Em 2001 foram realizados testes dos AWS (2MW) na Póvoa do Varzim, em Portugal [6].



Figura 2.4 – Dispositivo *Archimedes Wave Swing* (AWS) [7].

Este tipo de dispositivos pode também ser classificado como de absorção pontual (*Point Absorber Wave Energy*) por ter um diâmetro muito inferior ao comprimento da onda.

Um dispositivo flutuante deste tipo, semelhante ao sistema desenvolvido neste trabalho, é actualmente produzido pela *Rambøll* [3], na Dinamarca e consiste num flutuador ligado a um reservatório pressurizado ancorado por um cabo de poliéster. O movimento de

flutuação activa um êmbolo, inserido entre o cabo e o flutuador, utilizado para accionar um gerador eléctrico, produzindo energia que é transmitida por cabo submarino para uma estação em terra, onde a energia é rectificada de modo a ser introduzida na rede eléctrica.

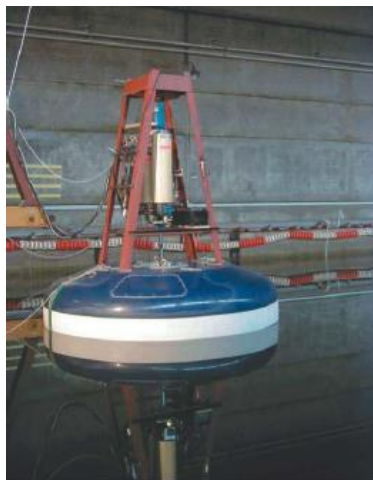


Figura 2.5 – Dispositivo *Point Absorber Wave Energy* [3].

A energia das ondas, como recurso renovável, tem sido pouco explorada, este facto não é estranho a inexistência de uma tecnologia capaz de garantir aos investidores rendimentos competitivos face a outros recursos renováveis, como por exemplo a eólica e a solar. A grande diversidade de dispositivos típica de uma tecnologia não estabilizada não transmite confiança a um investidor privado, pois este nem conseguiria uma opinião consensual sobre o tipo de máquina. Com o tempo, a passagem a tecnologia estabilizada vai implicar a existência de um número reduzido de dispositivos otimizados para a localização da sua implementação e consequentemente, um interesse do investidor privado. A energia das ondas tem várias vantagens relativamente a outros recursos renováveis: é mais previsível, mais constante e com maior fluxo de energia, podendo permitir que dispositivos de menor volume gerem mais energia, reduzindo-se os custos e o impacto ambiental.

2.2 Teoria Linear das Ondas

A opção pela teoria linear das ondas em detrimento de teorias mais precisas de ordens mais elevadas, como *Boussinesq* ou mesmo *Navier-Stokes*, justifica-se pela necessidade de descrever o escoamento apenas na vizinhança do corpo. Assim não é necessário uma teoria que descreva a propagação das ondas. Acresce ainda que o dispositivo em estudo deverá funcionar em situações de profundidade intermédia ou infinita, condições que conferem à teoria linear grande realismo.

Estando a teoria linear das ondas amplamente documentada na bibliografia, [8] opta-se aqui por apenas explicitar as expressões mais importantes e com implicações directas neste estudo.

Admitindo que o fluido é incompressível e invíscido e que o escoamento é irrotacional existe um potencial de velocidades. Como condições de fronteira considera-se: a profundidade, h , constante; que a pressão sobre a superfície livre é invariável (e igual à atmosférica); e que a onda é periódica e propagante. O problema é linearizado para ondas de pequena amplitude configurando um problema clássico de valores de fronteira, obtendo-se para a deformada da superfície livre [8]:

$$\eta = A. \sin(\omega t - kx) \quad (2.1)$$

onde A é a amplitude de onda, com frequência angular, ω , dada por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.2)$$

T é o período de onda, e k , o número de onda:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.3)$$

onde, λ representa o comprimento de onda.

O problema de valores de fronteira permite também obter a (celeridade) velocidade de propagação de onda, C [8]:

$$C = \sqrt{\frac{g}{k} \cdot \tanh(kh)} = \frac{\lambda}{T} \quad (2.4)$$

Em que g é a gravidade e h a profundidade.

Para profundidades infinitas ($\frac{h}{\lambda} > 0,05$), a expressão (2.4) simplifica-se,

$$C = \sqrt{\frac{g}{k}} = \sqrt{\frac{T \cdot g}{2 \cdot \pi}} \quad (2.5)$$

No âmbito deste trabalho interessa descrever o campo de velocidades e de pressão sobre a onda que para profundidades intermédias têm as seguintes equações [8]:

$$u = A \cdot \omega \cdot \frac{\cosh(k(h+z))}{\sinh(kh)} \cdot \sin(\omega t - kx) \quad (2.6)$$

$$w = A \cdot \omega \cdot \frac{\sinh(k(h+z))}{\sinh(kh)} \cdot \cos(\omega t - kx) \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} p &= -\rho g z + \rho g A \cdot \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \cdot \sin(kx - \omega t) = \\ &= -\rho g z + \rho g \eta \cdot \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} = -\rho g z + \rho g \cdot \eta \cdot K_p(z) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Onde ρ representa a massa volúmica do fluido e K_p , o factor de atenuação da pressão [8]:

$$K_p(z) = \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \quad (2.9)$$

Este factor tem um valor máximo à superfície livre e mínimo no fundo. Desta forma os conversores de energia das ondas submersos que utilizem a variação de pressão como força motriz não devem ser colocados a uma profundidade exagerada pois ficam sujeitos a uma menor variação de pressão. No entanto, as equações do campo velocidades sugerem que a instalação do dispositivo a uma maior profundidade o protege das tempestades.

Para profundidades infinitas as expressões (2.6), (2.7) e (2.8) podem simplificar-se:

$$u = \frac{2\pi}{T} \cdot A \cdot e^{kz} \cdot \sin(\omega t - kx) \quad (2.10)$$

$$w = \frac{2\pi}{T} \cdot A \cdot e^{kz} \cdot \cos(\omega t - kx) \quad (2.11)$$

$$p = -\rho g z + \rho g \cdot A \cdot e^{k \cdot z} \cdot \sin(\omega t - kx) \quad (2.12)$$

A integração, durante um ciclo, das velocidades permitem obter as equações das trajectórias das partículas que são linhas fechadas, elípticas para a situação de profundidade intermédia e circulares para profundidade infinita [8],

$$(x - x_0) = -A \cdot \frac{\cosh(k(h+z))}{\sinh(kh)} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (2.13)$$

$$(z - z_0) = -A \cdot \frac{\sinh(k(h+z))}{\sinh(kh)} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (2.14)$$

Para este trabalho é também importante conhecer o fluxo médio de energia por metro de largura de crista onda [8]:

$$F = \frac{1}{128\pi} \cdot \rho g^2 A^2 T \left[\frac{W}{m} \right] \quad (2.15)$$

2.3 O Problema de Radiação/Difracção e a Absorção de Energia

Um corpo flutuante, quando sujeito à excitação das ondas, comporta-se como um oscilador forçado.

A abordagem clássica considera o problema como linear, pode-se então utilizar o princípio da sobreposição e decompô-lo em dois problemas diferentes mas complementares, o problema de difracção e o de radiação. No problema de difracção o corpo permanece imóvel sujeito à acção das ondas e no de radiação é imposto um movimento ao corpo gerando-se ondas que são radiadas pela superfície livre isenta de outras perturbações. Na figura 2.7 ilustra-se a sobreposição dos dois problemas obtendo-se o problema completo.



Figura 2.6 - Sobreposição dos problemas de difracção e de radiação [9].

A hipótese de linearidade e consequente sobreposição de efeitos é também útil para compreender o funcionamento de um dispositivo de absorção pontual. Este dispositivo necessita de se mover para produzir energia, consequente tem de gerar ondas radiantes. A acção ideal do dispositivo no campo de ondas é ilustrada na figura 2.7.

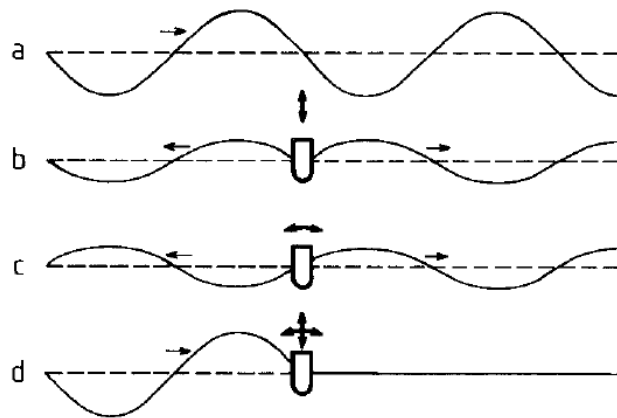


Figura 2.7 – a. Onda não perturbada; b. Ondas (simétricas) radiadas pelos corpos flutuantes oscilando verticalmente (em água calma); c. Ondas (anti-simétricas) geradas pelos corpos flutuantes oscilando horizontalmente (em água calma); d. Sobreposição (soma) das três ondas acima e consequente absorção completa da energia da onda incidente [10].

Os movimentos verticais e horizontais (curvas b e c) devem gerar uma onda com metade da amplitude da onda incidente (curva a). Escolhendo as fases de forma conveniente consegue-se deixar a onda incidente inalterada e absorver por completo a onda transmitida. Assim, as ondas radiadas (para o lado esquerdo) pelos dois modos de oscilação têm de estar em oposição de fase, para que se anulem não tendo assim nenhum efeito sobre a agitação incidente. Além disso no sentido oposto, estas ondas têm de estar na mesma fase, para que a sua soma anule a agitação.

Este cancelamento ou redução das ondas deve ser realizado pelo dispositivo através da imposição de uma lei de deslocamento apropriada, que lhe permite absorver a energia incidente.

De acordo com exposto, se o dispositivo tiver apenas um grau de liberdade (o vertical ou o horizontal) apenas poderá extrair metade da energia incidente, ainda que movimentando-se de forma ótima. Este facto deve-se a que metade da energia incidente é radiada pelo dispositivo. Nesta situação, a onda radiada para a esquerda e a onda radiada têm a mesma amplitude, que é metade da amplitude da onda incidente. Assim, de acordo com a equação 2.15, a energia da onda é proporcional ao quadrado da sua amplitude, tal facto significa que 25% da energia incidente é radiada para a esquerda, e também 25% é transmitida para a direita. Os restantes 50% podem ser absorvidos pelo sistema de absorção de energia. Estes resultados são comprovados para o sistema em estudo na secção 5.5.

2.4 Modelação Matemática de um Corpo Flutuante no Domínio da Frequência

No âmbito deste trabalho, pretende-se construir um modelo que permita descrever o movimento do corpo flutuante sob a acção da onda e de uma força externa de ligação ao dispositivo de extracção de energia. Para isto apresenta-se inicialmente o modelo clássico de um corpo flutuante livre.

A posição do flutuador é definida por um sistema de coordenadas cartesianas com origem no plano da superfície livre. Na figura 2.9, representam-se os 6 graus de liberdade e a respectiva nomenclatura naval. Note-se que a simetria axial do flutuador provoca que os modos de balanço e cabeceio sejam idênticos. Num navio, não axissimétrico, o balanço diz respeito às rotações segundo o eixo longitudinal e o cabeceio às rotações sobre o eixo lateral.

Sem perda de generalidade, assume-se que as ondas propagam-se segundo a direcção x .

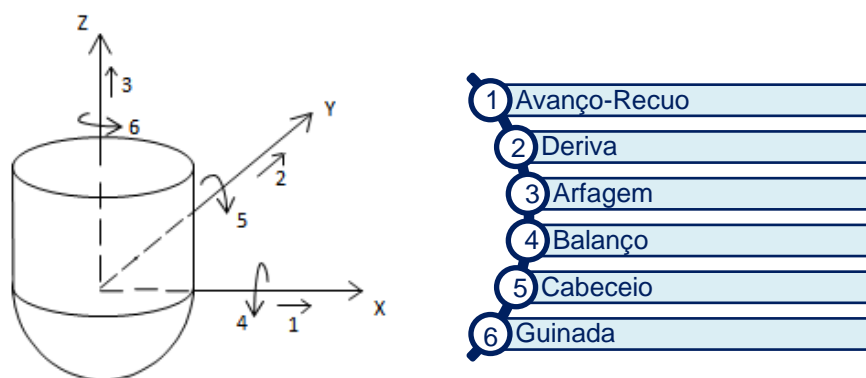


Figura 2.8 - Nomenclatura utilizada para definir os graus de liberdade.

Os modos 1, 2 e 3 correspondem às translações, respectivamente, nos eixos x , y e z . Os modos 4, 5 e 6 correspondem às rotações, respectivamente, nos eixos x , y e z .

Quando o movimento imposto ao corpo flutuante implica deslocamentos simultâneos em mais do que um grau de liberdade estes denominam-se de modos cruzados.

2.4.1 Equação de Laplace e Condições de fronteira

Nas hipóteses da teoria linear das ondas, aplicando o princípio da conservação da massa conclui-se que o potencial de velocidades tem de satisfazer a equação de *Laplace*.

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (2.16)$$

Na superfície livre têm de ser respeitadas duas condições de fronteira, uma de carácter dinâmico e outra de cinemático. A condição dinâmica resulta do facto de a superfície livre não suportar diferenças de pressão. A condição cinemática, que é uma condição de impermeabilidade, impõe que a velocidade do fluido é perpendicular à superfície e igual à sua velocidade. Combinando estas duas condições obtém-se a condição de fronteira para a superfície livre [11]:

$$\frac{d^2 \Phi}{dt^2} + g \cdot \frac{d\Phi}{dz} = 0 \text{ em } z = 0 \quad (2.17)$$

A condição sobre o corpo é uma condição de impermeabilidade e impõe que a velocidade do fluido perpendicular à superfície do corpo seja igual à velocidade deste na direcção normal à sua superfície. Exprime-se na forma linearizada por:

$$\frac{d\Phi}{dn} = U_n \text{ na superfície do corpo} \quad (2.18)$$

Admitindo que o fundo é um plano, $z = -h$, a condição de fronteira de impermeabilidade, impõe que a componente vertical da velocidade seja nula, em $z = -h$, o que implica que,

$$\frac{d\Phi}{dz} = 0 \text{ em } z = -h \quad (2.19)$$

Nas formulações no domínio da frequência e tempo deve ser imposta uma condição de fronteira no infinito (r tende para infinito) [11]:

$$\nabla \Phi \rightarrow 0 \text{ e } r \rightarrow \infty \text{ se } t > 0 \quad (2.20)$$

Vão ser procuradas apenas as soluções sinusoidais, como o sistema é linear podem-se sobrepor soluções para obter a resposta para um espectro de ondas. Assim, assumindo notação complexa admite-se que o potencial de velocidade tem uma expressão do tipo [11]:

$$\Phi(x, y, z, t) = \text{Re} \{ \phi(x, y, z, t) \cdot e^{i\omega \cdot t} \} \quad (2.21)$$

A equação de *Laplace* e as condições de fronteira adquirem então a forma [11]:

$$\nabla^2 \phi = 0 \text{ no fluído} \quad (2.22)$$

$$\frac{d\phi}{dz} \text{ em } z = -h \quad (2.23)$$

$$-\omega^2 \cdot \phi + g \cdot \frac{d\phi}{dz} = 0 \text{ em } z = 0 \quad (2.24)$$

$$\frac{d\phi}{dn} = U_n \text{ na superfície do corpo} \quad (2.25)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \cdot \left(\frac{d\phi}{dr} - i \cdot K \cdot \phi \right) = 0 \quad (2.26)$$

2.4.2 Decomposição do Potencial e Problemas de Radiação e Difracção

Como já referido anteriormente, considera-se o problema linear, podendo decompor-se o potencial total em [11]:

$$\phi = \phi^I + \phi^P + \phi^R \quad (2.27)$$

Onde ϕ^I é o potencial incidente, ϕ^P é o de perturbação ao potencial incidente considerando o corpo imóvel e ϕ^R é o potencial de radiação. O potencial de radiação para um corpo com 6 graus de liberdade pode ser decomposto em 6 parcelas relativas a cada um dos graus [11]:

$$\phi^R = \sum_{j=1}^6 \phi_j^R \quad (2.28)$$

A equação de *Laplace* e as condições de fronteira podem ser adaptadas aos problemas de radiação e de difracção. Assim, o potencial de velocidades do problema de radiação tem de satisfazer as condições [11]:

$$\nabla \phi^R = 0 \text{ no fluído} \quad (2.29)$$

$$-\omega^2 \cdot \phi^R + g \cdot \frac{d\phi^R}{dz} = 0 \text{ em } z = 0 \quad (2.30)$$

$$\frac{d\phi^R}{dz} = 0 \text{ em } z = -h \quad (2.31)$$

$$\frac{d\phi^R}{dn} = U_n \text{ na superfície do corpo} \quad (2.32)$$

$$\frac{d\phi^R}{dn} = i \cdot \omega \cdot n_j \text{ para } j = 1 \text{ a } 6 \quad (2.33)$$

$$\nabla \phi^R \rightarrow 0 \text{ e } r \rightarrow \infty \quad (2.34)$$

De forma análoga o potencial de velocidades do problema de difracção ($\phi^I + \phi^P$) tem de satisfazer, as mesmas condições. Note-se que o potencial da onda incidente, ϕ^I , é conhecido da teoria linear das ondas e respeita por hipótese as condições [11].

$$\nabla(\phi^I + \phi^P) = 0 \Leftrightarrow \nabla \phi^P = 0 \text{ no fluído} \quad (2.35)$$

$$\frac{d(\phi^I + \phi^P)}{dz} = 0 \Leftrightarrow \frac{d\phi^P}{dz} = 0 \text{ em } z = -h \quad (2.36)$$

$$-\omega^2 \cdot (\phi^I + \phi^P) + g \cdot \frac{d(\phi^I + \phi^P)}{dz} = 0 \Leftrightarrow -\omega^2 \cdot \phi^P + g \cdot \frac{d\phi^P}{dz} = 0 \text{ em } z = 0 \quad (2.37)$$

Na superfície do corpo o potencial de perturbação tem de anular o potencial da onda, garantindo a condição de impermeabilidade [11]:

$$\frac{d(\phi^I + \phi^P)}{dn} = 0 \Leftrightarrow \frac{d\phi^I}{dn} = \frac{d\phi^P}{dn} \quad (2.38)$$

2.4.3 Forças Hidrodinâmicas

Admitindo que se conhece os potenciais de velocidades, $\phi^I + \phi^R + \phi^P = \phi_{total}$ as forças aplicadas ao corpo podem ser determinadas integrando a pressão obtida pela equação de Bernoulli [11],

$$p - p_a = -\rho \left(\frac{d\phi}{dt} + \frac{1}{2} \cdot |\nabla \phi|^2 + g \cdot z_0 \right) \quad (2.39)$$

As forças aplicadas podem ser determinadas utilizando a decomposição do problema. A força de radiação é dada por [11]:

$$F^R = -\rho \iint_{s_0} \left(\frac{d\phi^R}{dt} \cdot \tilde{n} \right) ds \equiv -i \cdot \omega \cdot \rho \iint_{s_0} (\phi^R \cdot \tilde{n}) ds \quad (2.40)$$

Onde s_0 representa a superfície molhada média. Decompondo na parte real e imaginária [11] e para movimentos unitários pode escrever-se:

$$F_{ij}^R = \omega^2 \cdot A_{ij} - i \cdot \omega \cdot D_{ij} \quad (2.41)$$

Em que A_{ij} e D_{ij} são quantidades integrais obtidas por integração na superfície molhada da função do potencial de radiação e designam-se respectivamente por coeficiente massa adicionada e coeficiente de amortecimento. A força de radiação para um movimento com amplitude complexa, ζ_i no modo i vem então [11]:

$$F_{ij}^R = \zeta_i \cdot (\omega^2 \cdot A_{ij} - i \cdot \omega \cdot D_{ij}) \quad (2.42)$$

Note-se que A_{ij} , D_{ij} e ζ_i dependem da frequência de oscilação e do grau de liberdade.

Deste modo, a força de radiação é dada por duas componentes. A primeira componente está em fase com a aceleração do movimento e é equivalente a uma força de inércia para os movimentos de translação e a um momento de inércia para os movimentos de rotação. A interpretação física deste termo tem a ver com a força adicional necessária para acelerar esta massa de fluido conjuntamente com o corpo e, deste modo, o mesmo comporta-se como se tivesse uma massa acrescentada. Por outras palavras, o coeficiente de massa adicionada representa uma massa equivalente de fluido que tem a aceleração do corpo.

O segundo termo está em fase com a velocidade e representa uma força de amortecimento, proporcional à velocidade. Este termo de amortecimento está relacionado com a energia dissipada na geração e radiação de ondas devido ao facto do corpo se encontrar a oscilar junto à superfície livre.

Na prática o potencial de radiação é determinado resolvendo o problema de valores fronteira, discretizando a superfície molhada em painéis e determinando a distribuição de densidade de fontes que verificam: a equação de *Laplace*, a de superfície livre, a de impermeabilidade na superfície de corpo e no fundo. Conhecido o potencial ϕ^R os coeficientes de massa adicionada e os coeficientes de amortecimento podem ser determinados. Neste trabalho estes coeficientes são obtidos através do programa *WAMIT*.

A força de excitação, também denominada por força de difracção, resultante da acção da onda e da alteração provocada pela presença do corpo, é obtida resolvendo o problema de difracção obtendo-se [11]:

$$F_{ij}^E = -\rho \iint_{s_0} \left(\frac{d(\phi^I + \phi^P)}{dt} \cdot \tilde{n} \right) ds \quad (2.43)$$

O potencial ϕ^I é conhecido da teoria linear das ondas e a força associada a este potencial denomina-se por força de *Froude-Kirlov* [11].

$$F_{ij}^{FK} = -\rho \iint_{s_0} \left(\frac{d\phi^I}{dt} \cdot \tilde{n} \right) ds \quad (2.44)$$

Esta força é determinada assumindo que o corpo não perturba a onda incidente. Assim, corresponde à acção isolada da onda sobre a parte molhada do corpo. Note-se que se o comprimento de onda é muito maior que o comprimento do corpo, a força preponderante é a *Froude-Kirlov*. É então necessário calcular a força que resulta da perturbação ao potencial da onda incidente, normalmente designada por força de difracção.

1º Método – Resolver o problema de valores de fronteira (equações 2.35 a 2.38). Este problema é semelhante ao de radiação. O *WAMIT* tem uma opção para resolver o problema por este método.

2º Método – Utilizar as relações de *Haskind-Newman*, que permitem relacionar o potencial de difracção com o de radiação fazendo apelo ao teorema de *Green*. Este teorema

relaciona soluções da equação de *Laplace* (note-se que ambos os potenciais ϕ^R e ϕ^P são soluções desta equação) pelo que permite calcular o potencial de difracção a partir do potencial de radiação. A principal vantagem na utilização das relações de *Haskind* reside na redução do esforço computacional. O *WAMIT* tem também esta opção para o cálculo da força de excitação.

Por último, a força hidrostática, resultante da integração do termo hidrostático na superfície molhada instantânea é dada [11]:

$$F^H = -\rho \cdot g \iint_S (z \cdot \tilde{n}) ds \quad (2.45)$$

Onde s representa a superfície média molhada e \tilde{n} é a normal exterior à superfície. A força de restituição resulta da combinação da força hidrostática com a força gravítica aplicada ao corpo flutuante. Estas forças só existem nos modos de arfagem, cabeceio e balanço.

2.4.4 Equações do Movimento

Nesta secção obtém-se as equações do movimento para um corpo flutuante axissimétrico e com movimentos de arfagem, cabeceio e avanço.

A 2ª lei de *Newton* permite escrever a seguinte equação vectorial [11]:

$$\sum_{j=1}^6 [(M_{ij} + A_{ij}) \cdot \ddot{\zeta}_i + D_{ij} \cdot \dot{\zeta}_i + C_{ij} \cdot \zeta_i] = F_{ij}^{FK} + F_{ij}^D = F_{ij}^E \quad (2.46)$$

Nesta expressão M_{ij} representa a matriz de massas que é dada por [11]:

$$M_{ij} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & m \cdot z_0 & 0 \\ 0 & m & 0 & -m \cdot z_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -m \cdot z_0 & 0 & I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ m \cdot z_0 & 0 & 0 & I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ 0 & 0 & 0 & I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

onde m representa a massa do corpo e z_0 a distância ao centro de massa. A_{ij} é a matriz de massa adicionada [11]:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & a_{15} & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & a_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{42} & 0 & a_{44} & 0 & 0 \\ a_{51} & 0 & 0 & 0 & a_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

$a_{11} = a_{22}$, $a_{44} = a_{55}$, $a_{24} = a_{42} = -a_{15} = -a_{51}$ e como o corpo é axissimétrico, segundo o eixo vertical, z , os movimentos de guinada (modo 6) não existem.

Como a onda se propaga segundo x considera-se que o corpo só roda em torno de y , logo a_{42} e a_{24} são eliminadas.

A matriz de amortecimento D_{ij} é dada por [11]:

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_{42} & 0 & d_{44} & 0 & 0 \\ d_{51} & 0 & 0 & 0 & d_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

A matriz de restituição C_{ij} é dada por [11]:

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Para um corpo axissimétrico e em equilíbrio na ausência de ondas, a matriz de restituição tem os seguintes coeficientes não nulos:

$$C_{33} = \rho \cdot g \cdot S_3 \quad (2.51)$$

$$C_{44} = \rho \cdot g \cdot S_{22} + \rho \cdot g \cdot \nabla \cdot (z_B - z_G) \quad (2.52)$$

$$C_{55} = C_{44} \quad (2.53)$$

Em que S_3 representa a área da secção do corpo na superfície não perturbada, S_{22} é o momento de inercia da superfície resultante do corte pelo plano vertical, ∇ é o volume do corpo submerso, z_B é a coordenada do centro de impulsão e z_G é a coordenada do centro de gravidade.

A matriz das forças e momentos de excitação, F_{ij}^{FK} é dada por [11]:

$$F_i^{FK} = [F_x \quad F_y \quad F_z \quad M_x \quad M_y \quad M_z] \quad (2.54)$$

Admitindo perturbações sinusoidais, para a direcção a que corresponde o modo de arfagem, a solução será do tipo ($i=3$) [11]:

$$\hat{\zeta}_3(t) = \text{Re}(\zeta_3 \cdot e^{i\omega \cdot t}) \equiv \text{Re}(\zeta_3 \cdot (\cos(\omega \cdot t) + i \cdot \text{sen}(\omega \cdot t))) \quad (2.55)$$

Logo a velocidade vem [11]:

$$\hat{\dot{\zeta}}_3(t) = \text{Re}(i \cdot \omega \cdot \zeta_3 \cdot e^{i\omega \cdot t}) \quad (2.56)$$

E a aceleração [11]:

$$\hat{\ddot{\zeta}}_3(t) = \text{Re}(-\omega^2 \cdot \zeta_3 \cdot e^{i\omega \cdot t}) \quad (2.57)$$

Resumindo para o modo de arfagem a equação do movimento escreve-se [11]:

$$(M_{33} + A_{33}) \cdot \ddot{\zeta}_3 + D_{33} \cdot \dot{\zeta}_3 + C_{33} \cdot \zeta_3 = F_3^{FK} + F_3^D = F_3^E \quad (2.58)$$

O que no domínio da frequência conduz a:

$$\begin{aligned} (M_{33} + A_{33}) \cdot (-\omega^2 \cdot \zeta_3) + D_{33} \cdot (i \cdot \omega \cdot \zeta_3) + C_{33} \cdot \zeta_3 &= F_3^E \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \zeta_3 &= \frac{F_3^E}{i \cdot \omega \cdot D_{33} - \omega^2 (M_{33} + A_{33}) + C_{33}} \end{aligned} \quad (2.59)$$

Logo a equação da velocidade vem:

$$\dot{\zeta}_3 = \frac{F_3^E}{D_{33} + i \cdot \omega \cdot (M_{33} + A_{33}) - i \cdot \frac{C_{33}}{\omega}} \quad (2.60)$$

Na determinação dos valores das amplitudes complexas para os modos de avanço-recuo (1) e de cabeceio (5) é necessário recorrer a um sistema de equações, uma vez que as equações do movimento para estes modos têm termos cruzados, porque os coeficientes de massa adicionada e o termo da força de radiação do modo 1 actuam em 5 e vice-versa. Deste modo, para amplitude complexa do modo de avanço, ζ_1 , vem [12]:

$$\zeta_1 = \frac{\tilde{D} \cdot F_1^E - \tilde{B} \cdot F_5^E}{\tilde{A} \cdot \tilde{D} - \tilde{B} \cdot \tilde{C}} \quad (2.61)$$

e para amplitude ζ_5 vem [12]:

$$\zeta_5 = \frac{-\tilde{C} \cdot F_1^E + \tilde{A} \cdot F_5^E}{\tilde{A} \cdot \tilde{D} - \tilde{B} \cdot \tilde{C}} \quad (2.62)$$

onde \tilde{A} , \tilde{B} , \tilde{C} e \tilde{D} são dados pelas seguintes expressões [12]:

$$\tilde{A} = -\omega^2(M_{11} + A_{11}) + i \cdot \omega \cdot D_{11} + C_{11} \quad (2.63)$$

$$\tilde{B} = -\omega^2 \cdot A_{15} + i \cdot \omega \cdot D_{15} \quad (2.64)$$

$$\tilde{C} = -\omega^2 \cdot A_{51} + i \cdot \omega \cdot D_{51} \quad (2.65)$$

$$\tilde{D} = -\omega^2(I_{yy}^F + A_{55}) + i \cdot \omega \cdot D_{55} + \rho \cdot g \cdot M_{55} \quad (2.66)$$

Como já referido anteriormente, ao longo deste estudo apenas é considerado o modo de arfagem e a respectiva equação, pois no dispositivo em estudo, o flutuador praticamente apenas se deslocará na vertical (segundo zz, ver figura 2.8).

2.5 Equação do Movimento com Sistema de PTO com um Grau de Liberdade (arfagem)

Obtido na anterior secção o modelo matemático de um corpo flutuante é necessário generalizar as equações para a situação em que o corpo está ligado a um sistema de extracção de energia (sistema de *power take-off*). Neste trabalho considera-se que o sistema flutuante tem apenas o grau de liberdade de arfagem livre. Na figura 2.10, representa-se esquematicamente o sistema de um corpo flutuante com apenas movimento de arfagem. À massa própria foi acrescentada a massa adicionada ($M_{33} + A_{33}$), a dissipação por radiação é representada pelo componente dissipativo (D_{33}) e uma componente de restituição elástica (C_{33}). Note-se que os coeficientes de massa, dissipação e elásticos não são constantes dependendo da frequência de oscilação.

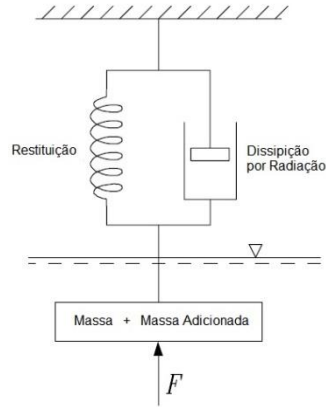


Figura 2.9 – Sistema flutuante equivalente [10].

O movimento ressonante obtém-se quando o corpo é excitado com frequência igual à sua frequência de oscilação natural. Nesta situação a força de excitação encontra-se em fase com a sua velocidade.

Seguidamente introduz-se o sistema de *PTO* e obtêm-se as equações do movimento. Este sistema é modelado considerando que a energia extraída é equivalente à energia dissipada por um sistema de amortecimento. A tecnologia do *PTO* pode ter uma componente elástica que lhe permita armazenar e transmitir energia ao dispositivo.

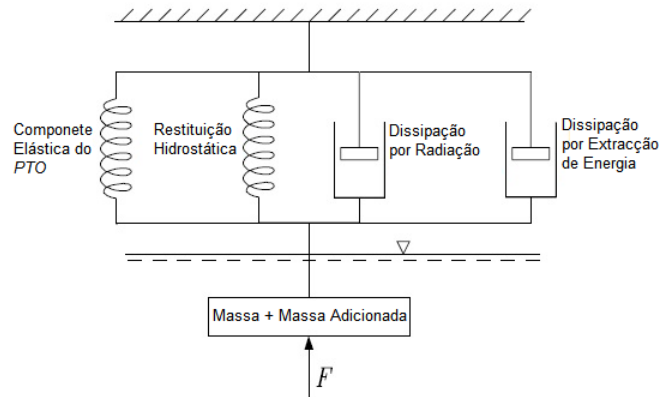


Figura 2.10 - Sistema com *PTO* equivalente.

A modelação matemática do *PTO* faz-se a partir da aplicação da segunda lei de *Newton*, introduzindo a força provocada pelo mecanismo de extracção de energia:

$$\sum_{j=1}^6 [(M_{ij} + A_{ij}) \cdot \ddot{\zeta}_j + D_{ij} \cdot \dot{\zeta}_j + C_{ij} \cdot \zeta_j] = F_{ij}^E + F_{pto} \quad (2.67)$$

O termo F_{pto} representa a força associada ao sistema de extracção de energia, que pode ser decomposta nas suas componentes elástica e dissipativa:

$$F_{pto} = -K_{pto} \cdot \zeta_3 - D_{pto} \cdot \dot{\zeta}_3 \quad (2.68)$$

Em que D_{pto} e K_{pto} são, respectivamente, o coeficiente de amortecimento e o coeficiente elástico do sistema de extracção de energia. Assim, a amplitude do movimento incluindo o sistema de *PTO*, para o modo de arfagem, escreve-se:

$$-(M_{33} + A_{33}) \cdot (-\omega^2 \cdot \zeta_3) + (D_{33} + D_{pto}) \cdot (i \cdot \omega \cdot \zeta_3) + (C_{33} + K_{pto}) \cdot \zeta_3 = F_3^E \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \zeta_3 = \frac{F_3^E}{i \cdot \omega \cdot (D_{33} + D_{pto}) - \omega^2 (M_{33} + A_{33}) + (C_{33} + K_{pto})} \quad (2.69)$$

Vindo para a velocidade

$$\dot{\zeta}_3 = \frac{F_3^E}{(D_{33} + D_{pto}) - i \cdot \omega \cdot (M_{33} + A_{33}) - i \cdot \frac{(C_{33} + K_{pto})}{\omega}} \quad (2.70)$$

2.5.1 Condições de Absorção Óptimas

Sendo a potência máxima extraída obtida para condições de ressonância do sistema e estas implicarem que a velocidade esteja em fase com a força de excitação, da equação 2.70 conclui-se que a parte imaginária tem de ser nula:

$$-i \cdot \omega \cdot (M_{33} + A_{33}) - i \cdot \frac{(C_{33} + K_{pto})}{\omega} = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow -i \cdot \omega \cdot (m_F + A_{33}) = i \cdot \frac{(C_{33} + K_{pto})}{\omega} \Leftrightarrow$$

$$K_{pto} = -\omega^2 \cdot (m_F + A_{33}) - C_{33} = (K_{pto})_{optm} \quad (2.71)$$

O coeficiente elástico óptimo do *PTO* é função da frequência e pode tomar valores positivos e negativos. Na prática é difícil construir um dispositivo com componentes elásticas que dependam da frequência de excitação e que efectuem um efeito de mola (valores positivos) e de atuador (valores negativos).

Para determinar o coeficiente de amortecimento do *PTO* óptimo recorre-se à relação entre a energia máxima extraída e a energia radiada, o que permite concluir [12]:

$$(D_{pto})_{optm} = D_{33} \quad (2.72)$$

Ou seja, para cada frequência, o coeficiente de amortecimento óptimo do *PTO*, D_{pto} , deve ser igual ao coeficiente de amortecimento de arfagem, D_{33} , do corpo flutuante. Na prática é tecnologicamente complexo construir um sistema de conversão de energia com propriedades que dependam da frequência.

2.5.2 Equações da Potência

Sendo a potência o produto da força pela velocidade vem para a potência de excitação, P_E ,¹ [12],

$$P_E(t) = F_E(t) \cdot \dot{\zeta}(t) \quad (2.73)$$

$$P_E(t) = \left(\frac{F^E}{2} \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} + \frac{F^{E^*}}{2} \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot t} \right) \cdot \left(\frac{\dot{\zeta}}{2} \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} + \frac{\dot{\zeta}^*}{2} \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot t} \right) =$$

¹ O símbolo X^* denota o complexo conjugado de X .

$$= \frac{1}{4} \cdot \left(F^E \cdot \dot{\zeta}^\circ + F^E \cdot \dot{\zeta}^\circ + F^E \cdot \dot{\zeta} \cdot e^{2i\omega t} + F^{E^\circ} \cdot \dot{\zeta}^\circ \cdot e^{-2i\omega t} \right)$$

Os últimos dois termos, sendo conjugados um do outro, representam uma oscilação harmónica com frequência 2ω , e a soma dos seus tempos médios é nula (Falnes, 2002). A potência média de excitação vem [12]:

$$P_E \equiv \overline{P(t)} = \frac{1}{4} \cdot (F^E \cdot \dot{\zeta}^\circ + F^E \cdot \dot{\zeta}^\circ) = \frac{1}{2} \cdot \text{Re}\{F^E \cdot \dot{\zeta}^\circ\} = \frac{1}{2} \cdot |F^E| \cdot |\dot{\zeta}| \cdot \cos(\varphi_j) \quad (2.74)$$

Onde $\varphi_j = \varphi_u - \varphi_F$.

φ_u representa a fase da velocidade e φ_F a fase da força de excitação. A potência de radiação, P_R , obtém-se a partir do coeficiente de amortecimento (D), [12].

$$P_R = \frac{1}{2} \cdot D \cdot |\dot{\zeta}|^2 \quad (2.75)$$

A conservação de energia implica que a potência absorvida, P_A , seja igual à diferença entre a potência de excitação e a radiada.

$$P_A = P_E - P_R \quad (2.76)$$

Através da condição óptima (2.72) obtém-se a potência radiada máxima [12]:

$$P_{Rmax} = \frac{1}{2} \cdot D_{pto} \cdot |\dot{\zeta}|^2 = \frac{1}{2} \cdot D_{pto} \cdot |i \cdot \omega \cdot \zeta|^2 \quad (2.77)$$

Traduzindo a equação (2.69), o movimento do sistema com *PTO*, a sua substituição em (2.76) permite obter a potência radiada máxima. Como citado na secção 2.3 a potência radiada tem de ser igual à absorvida máxima, vindo:

$$\begin{aligned} P_{Amax} &= \frac{1}{2} \cdot D_{pto} \cdot \omega^2 \cdot \left| \frac{F_3^E}{(2 \cdot D_{pto}) - i \cdot \omega \cdot (M_{33} + A_{33}) - i \cdot \frac{(C_{33} + K_{pto})}{\omega}} \right|^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot D_{pto} \cdot \omega^2 \cdot \frac{|F_3^E|^2}{4 \cdot D_{pto}^2 \cdot \omega^2} = \\ P_{Amax} &= \frac{|F_3^E|^2}{8 \cdot D_{pto}} \end{aligned} \quad (2.78)$$

A potência máxima que um sistema pode absorver é assim função da força de excitação, que depende da onda incidente e da sua difracção (geometria do corpo flutuante) e das características dissipativas do sistema de *PTO*.

3 Modelação Numérica

Neste capítulo, apresenta-se uma ferramenta numérica, que permite modelar um corpo flutuante livre ou acoplado a um sistema de extracção de energia. A ferramenta é constituída por três programas: um programa de geração de malha na linguagem *Python*, o *WAMIT* para modelar o corpo flutuante e o *MATLAB* para tratar os valores das variáveis de saída do *WAMIT* e para modelar o *PTO*.

3.1 Descrição

O programa *WAMIT* necessita de quatro ficheiros de entrada em formato de texto: os ficheiros do potencial e das forças, o ficheiro de configuração e o ficheiro de dados geométricos. Para gerar este último recorrer-se a um código, escrito em *Python*, para discretizar a superfície do corpo flutuante. Do *WAMIT* obtêm-se quatro ficheiros de saída com as variáveis escolhidas: coeficientes de massa adicionada e amortecimento, forças de excitação e movimento descrito pelo corpo flutuante.

De seguida, utiliza-se um código em *MATLAB* que trata os ficheiros de saída do *WAMIT*. Este código agrupa os dados consoante o seu modo de liberdade para que posteriormente possam ser representados graficamente. Outro código, também em *MATLAB*, foi escrito para modelar o *PTO* e o corpo flutuante para o modo de arfagem.

Na figura 3.1 divide-se a ferramenta em duas partes referentes à modelação numérica e ao tratamento de resultados.

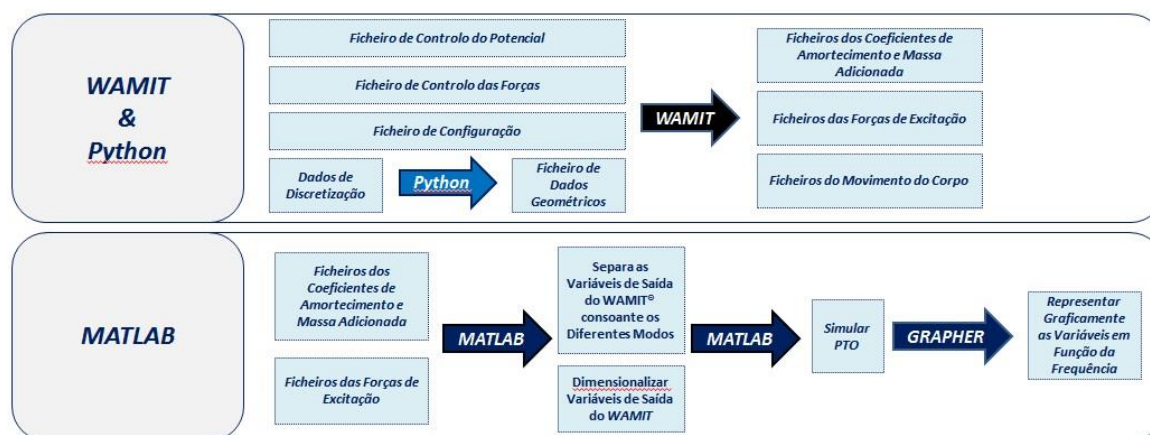


Figura 3.1 – Descrição da Ferramenta.

3.2 WAMIT

De seguida, apresenta-se o programa *WAMIT* e descreve-se, do ponto de vista do utilizador, a definição das variáveis de entrada. Seguidamente explicitam-se as saídas do programa e a sua utilização, no âmbito deste trabalho.

De acordo com o exposto no capítulo 2, a determinação do movimento e das forças actuantes num corpo flutuante é feita recorrendo a parâmetros matriciais que traduzem a

interacção entre o sólido e o fluido. A determinação destes parâmetros é complexa e envolve um esforço algébrico elevado, o que motivou a comunidade científica a desenvolver programas numéricos específicos.

Neste trabalho, recorre-se a um modelo numérico desenvolvido para avaliar os movimentos e as acções exercidas pelas ondas marítimas em corpos flutuantes, o programa comercial *WAMIT*.

3.2.1 Descrição

Este programa foi desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Oceânica do *MIT* [13] e é um dos mais utilizados pela indústria *offshore* e de construção de dispositivos de aproveitamento de energia das ondas, devido ao desempenho dos algoritmos que utiliza para o cálculo da equação integral de Green [13], e permite a modelação de vários corpos simultaneamente localizados na superfície livre, submersos ou no fundo do mar.

O programa *WAMIT* divide-se em dois subprogramas que são executados separadamente, o *Poten* e o *Force*. O *Poten* resolve os potenciais de velocidade, de radiação e de difracção na superfície do corpo. O *Force* calcula os coeficientes hidrodinâmicos, os movimentos do corpo e as forças que nele actuam. Nos ficheiros de configuração existem opções que permitem executar apenas um destes dois subprogramas. Os dados para execução dos subprogramas, *Poten* e *Force*, são descritos nos ficheiros de controlo potencial (*Potential Control Files*) e de controlo das forças (*Force Control Files*), com as extensões *.pot* e *.frc*, respectivamente.

Nas próximas secções é explicitado como devem ser escritos os ficheiros de entrada do programa, bem como o tipo e conteúdo dos ficheiros de saída.

3.2.2 Ficheiros de entrada

Para correr o programa no âmbito da modelação de um corpo flutuante livre, é necessário fornecer quatro ficheiros de entrada, em formato de texto, que devem estar posicionados na directoria de trabalho.

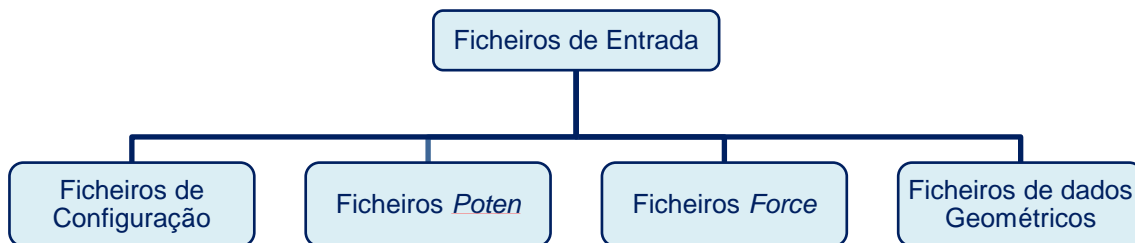


Figura 3.2 – Esquema dos ficheiros de entrada.

Para facilitar os trabalhos repetitivos podemos construir uma *batfile* para tal fornecermos mais dois ficheiros opcionais, também eles em formato de texto, *fnames.wam* (com o nome seguido da extensão dos quatro ficheiros de entrada) e *wamit.bat* com a directoria do ficheiro executável.

- Ficheiro de controlo do Potencial

A estrutura do ficheiro do potencial deve ser especificada nos ficheiros de configuração por ter três estruturas possíveis. De seguida, é descrito apenas uma destas estruturas, onde os valores numéricos escolhidos devem substituir os nomes das variáveis de entrada:

```
HBOT
IRAD IDIFF
NPER
PER (1) PER (2) . . . PER (NPER)
NBETA
BETA (1) BETA (2) . . . BETA (NBETA)
NBODY
GDF
XBODY (1) XBODY (2) XBODY (3)
MODE (1) MODE (2) MODE (3) MODE (4) MODE (5) MODE (6)
```

Tabela 1 – Estrutura do Ficheiro de controlo do Potencial com os nomes das variáveis.

HBOT representa a profundidade da água no local em estudo. Para profundidades infinitas devem usar-se valores iguais ou inferiores a 0.

IRAD e *IDIFF* são índices usados para especificar se os problemas de radiação e difracção, respectivamente, são resolvidos ou não. Quando assumem valores iguais a -1, não resolvem os respectivos problemas. Para valores iguais a 0, resolvem os problemas apenas para os graus de liberdade escolhidos nas variáveis *MODE* deste mesmo ficheiro. Para valores iguais a 1, resolvem os problemas para todos os modos.

NPER é o número (inteiro) de períodos de onda que serão analisados. *PER* é uma matriz que pode ser expressa em períodos, frequências ou até números de onda, para profundidade infinita. Esta dimensão deve ser escolhida, no ficheiro de configuração, na variável *IPERIO*.

NBETA é a amplitude de onda incidente e *BETA* é a matriz com os ângulos das ondas incidentes a serem analisados.

NBODY é o número de corpos existentes.

GDF é o nome dado ao ficheiro geométrico.

XBODY são as coordenadas da origem do corpo no sistema de coordenadas. *MODE* é a matriz de seis elementos, que indica o número de graus de liberdade do corpo. Quando um modo assume valor 1, é considerado o grau de liberdade, quando assume valor 0 é desprezado esse movimento.

- Ficheiro de controlo das Forças

A estrutura do ficheiro das forças deve ser especificada no ficheiro de configuração, por este ter duas estruturas possíveis. De seguida, é descrita uma destas estruturas, onde os valores numéricos escolhidos devem substituir os nomes das variáveis:

```

IOPTN(1) IOPTN(2) IOPTN(3) IOPTN(4) IOPTN(5) IOPTN(6) IOPTN(7)
IOPTN(8) IOPTN(9)

RHO

XCG YCG ZCG

IMASS

EXMASS(1,1) EXMASS(1,2) ... EXMASS(1,6)

EXMASS(2,1) EXMASS(2,2) ... EXMASS(2,6)
...
EXMASS(6,1) EXMASS(6,2) ... EXMASS(6,6)

IDAMP

ISTIF

BETAH

NFIELD

```

Tabela 2 – Estrutura do Ficheiro de controlo das Forças com os nomes das variáveis.

IOPTN é uma matriz linha com nove índices de opções, que indicam as variáveis obtidas nos ficheiros de saída. Se os índices assumirem o valor igual a 1, o respectivo ficheiro de saída é calculado, no caso de serem iguais a 0, os respectivos ficheiros não são calculados. As opções correspondem aos ficheiros de saída com os seguintes conteúdos:

- 1 – Coeficientes de massa adicionada e amortecimento.
- 2 – Forças de excitação obtidas através da relação de *Haskind*.
- 3 – Forças de excitação obtidas através do potencial de difracção.
- 4 – Movimento do corpo.
- 5p – Pressão hidrodinâmica na superfície do corpo.
- 5v – Vector velocidade na superfície livre.
- 6 – Campo de pressões na superfície livre.
- 7 – Campo de velocidade.
- 8 – Forças de arrasto e momento obtido pelo impulso.
- 9 – Forças de arrasto e momento obtido pela pressão.

RHO é o valor da densidade do fluido, e as unidades devem ser coerentes com as unidades de GRAV (no ficheiro de dados geométricos).

XCG, YCG e ZCG correspondem às coordenadas do centro de gravidade do corpo e devem estar nas mesmas unidades que ULEN (ficheiro de dados geométrico 3.2.3).

Se IMASS for igual a 1, o programa considera uma matriz EXMASS, se for igual a 0 o programa considera a matriz EXMASS como uma matriz nula.

O volume imerso do corpo é definido através da malha gerada ficando assim, determinada a impulsão média. A inércia (massa, momentos e produtos de inercia) é introduzida pelo utilizador. EXMASS é a matriz dos momentos de inércia do corpo em eixos fixos. Estes foram obtidos através do *SolidWorks*. Quando se opta apenas pelo modo de

arfagem, esta matriz pode ser substituída por um 0, pois o corpo flutuador é axissimétrico segundo zz. Nesta situação define-se apenas a variável IMASS.

IDAMP e ISTIF devem ser 0, para não serem consideradas, respectivamente, matrizes de amortecimento e de rigidez de um sistema a acoplar.

BETAH é o ângulo entre a direcção pré definida do corpo flutuante e a direcção de propagação da onda, em graus. Neste estudo, como o corpo flutuante se encontra fixo, não navegando na direcção horizontal, considera-se que este ângulo é 0.

NFIELD é o número de pontos na superfície livre em que a pressão hidrostática é calculada.

- Ficheiros de Configuração

O ficheiro de configuração (*config.wam*) é usado para especificar vários parâmetros e opções de resolução. De seguida, são especificadas as variáveis de entrada utilizadas neste ficheiro, e que devem ser seguidas com um sinal de igual e o respectivo valor:

```
ILOWHI=  
IPOTEN=  
IFORCE=  
IALTPOT=  
IALTFRC=  
ISOLVE=  
IQUAD=  
ILOG=  
IDIAG=  
ISCATT=  
IPERIO=  
ISOR=  
IRR=  
USERID_PATH=
```

Tabela 3 – Estrutura do Ficheiro de Configuração.

ILOWHI é um índice que diferencia o uso do método de primeira (=0) ou de segunda ordem (=1). O método de primeira ordem caracteriza-se por recorrer a uma geometria do corpo, representada por um conjunto de painéis quadriláteros, e considera que o potencial de velocidades é constante em cada painel.

IPOTEN e *IFORCE* especificam se é pretendido executar os subprogramas *POTEN* e *FORCE*, respectivamente. Se assumirem valores de 1, os subprogramas são executados, e se forem iguais a 0, não.

IALTPOT e *IALTFRC* especificam o formato utilizado nos ficheiros de controlo de potencial e de força.

ISOLVE permite escolher o método de resolução do problema. Podemos optar entre o método directo (=0) ou iterativo (=1).

IQUAD, *ILOG* e *IDIAG* são variáveis que permitem aumentar a precisão em cada painel, no cálculo da função de Green.

ISCATT permite optar entre duas equações para a resolução. Quando assume o valor de 0, utiliza a equação do problema de difracção, e para valor 1, utiliza a equação do problema de radiação.

IPERIO especifica as unidades dos dados de entrada de *PER* no ficheiro de controlo de potencial. Se tiver valor igual a 1, os valores devem ser períodos (em segundos), se for igual a 2, os valores devem ser frequências (em radianos por segundo), e igual a 3 e 4 para números de onda de profundidade, respectivamente, infinita e finita.

ISOR é um índice que especifica a consideração, ou não, das “*source strenght*” no programa e assume valores de 1 ou 0, respectivamente.

IRR especifica se as frequências irregulares são, ou não são, removidas. As frequências irregulares são removidas se o valor da variável assumir o valor de 0. Para valores superiores, as frequências irregulares não são removidas. Se for 1, o utilizador não necessita de representar a superfície livre, se for 2, o programa representa os painéis na superfície livre e se for 3, o programa discretiza a superfície livre.

USERID_PATH é onde deve ser especificada a directoria onde o ficheiro de instalação *USERID.WAM* está localizado. Este comando é essencial para a execução do programa.

Para este estudo, escolheu-se o método de primeira ordem e como método de resolução o método iterativo, optou-se por executar o subprograma *Poten* e escolheu-se a opção que permite introduzir nos ficheiros de controlo de potencial números de onda de profundidade infinita em vez de frequências ou períodos.

- Ficheiro de Dados Geométricos

O ficheiro de dados geométrico (*geometric data file* – com a extensão *.gdf*) contém uma descrição da superfície discretizada (apenas a superfície submersa), inclui a escala de comprimento do corpo, a gravidade, os índices de simetria, o número total de painéis e para cada painel as coordenadas cartesianas *x*, *y*, *z* dos seus quatro vértices. Quando as coordenadas de dois vértices coincidem, um painel degenera num triângulo. A ordem em que os painéis estão definidos no ficheiro é insignificante, mas cada painel deve ser descrito por um conjunto de 12 coordenadas que devem estar consecutivamente em colunas.

A única restrição é a ordem das coordenadas de cada painel, que deve obedecer à regra da “mão direita” com a normal na direcção do “lado molhado” de cada painel, sentido exterior. Na figura 3.4, a vista do painel *i* é do “lado molhado”, dentro do domínio do fluido, de modo que a ordenação destes vértices aparece no sentido anti-horário. A vista do painel *j* é do “lado seco”, fora do domínio do fluido, de modo que a ordenação dos vértices aparece no sentido horário. O eixo *z* deve ser vertical e positivo para cima, tal como indicado na figura 3.4.

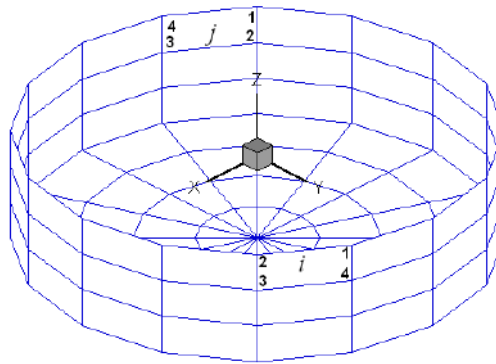


Figura 3.3 – Discretização de um cilindro mostrando a convenção da numeração dos vértices de cada painel, [13].

As variáveis de entrada devem estar na ordem e com a estrutura indicada abaixo, com pelo menos um espaço vazio que separa os dados sobre a mesma linha:

```

ULEN GRAV
ISX ISY
NPAN
X1 (1) Y1 (1) Z1 (1)
X2 (1) Y2 (1) Z2 (1)
X3 (1) Y3 (1) Z3 (1)
X4 (1) Y4 (1) Z4 (1)
X1 (2) Y1 (2) Z1 (2)
X2 (2) Y2 (2) Z2 (2)
X3 (2) Y3 (2) Z3 (2)
X4 (2) Y4 (2) Z4 (2)
...

```

Tabela 4 – Estrutura do Ficheiro de Dados Geométricos.

ULEN representa o comprimento característico do corpo que é utilizado para a adimensionalização das variáveis de saída do *WAMIT*.

GRAV representa a aceleração da gravidade nas mesmas unidades de comprimento usadas para definir a variável *ULEN*. As unidades de tempo são sempre os segundos.

ISX e *ISY* são os índices de simetria do corpo, que assumem os valores inteiros 0 ou 1. Referem-se respectivamente aos planos $x=0$ e $y=0$. Quando estas variáveis são iguais a 1, existe plano de simetria, quando são iguais a zero não existe plano de simetria. Deste modo, se *ISX* ou/e *ISY* assumirem valores iguais a 1, existe um ou dois planos geométricos de simetria e as coordenadas dos vértices são restritas a apenas metade ou um quadrante do

corpo. Inversamente, se $ISX = 0$ e $ISY = 0$, a superfície do corpo deve ser representada pelas coordenadas de todos os painéis.

$NPAN$ é o número de painéis definidos neste ficheiro, ou seja, o número necessário para discretizar um quarto, metade ou a totalidade da superfície do corpo, se existirem dois, um ou nenhum plano de simetria, respectivamente.

$X1(1)$, $Y1(1)$, $Z1(1)$ são as coordenadas (x, y, z) do primeiro vértice do primeiro painel. $X2(1)$, $Y2(1)$, $Z2(1)$ são as coordenadas (x, y, z) do segundo vértice do primeiro painel, e assim em diante. Estas são expressas nas mesmas unidades de comprimento que a variável $ULEN$. Como já referido anteriormente, os vértices devem ser numerados no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio quando o painel é visto a partir do domínio de fluido, como exemplificado na Figura 3.4.

3.2.3 Ficheiros de Saída

Os ficheiros de saída são ficheiros de texto com as variáveis escolhidas na opção $IOPTN$ dos ficheiros das forças. Neste estudo foi apenas necessário recorrer aos seguintes ficheiros de saída:

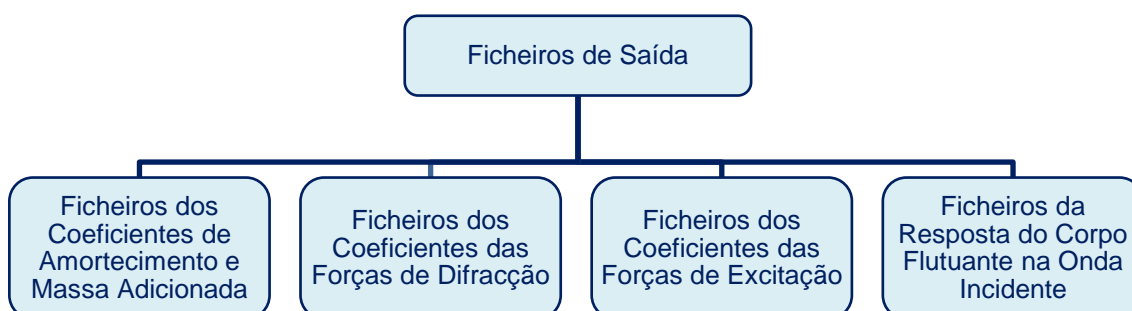


Figura 3.4 – Ficheiros de saída.

Estas variáveis, em função de PER , períodos de onda, encontram-se distribuídas em colunas e para cada ficheiro estas correspondem às seguintes variáveis (apenas estão presentes os ficheiros de saída utilizados neste estudo):

$OPTN(1) :$	PER	I	J	A_{ij}	D_{ij}		
$OPTN(3) :$	PER	$BETA$	I	$Mod(F_{ei})$	$Pha(F_{ei})$	$Re(F_{ei})$	$Im(F_{ei})$
$OPTN(4) :$	PER	$BETA$	I	$Mod(\xi_i)$	$Pha(\xi_i)$	$Re(\xi_i)$	$Im(\xi_i)$

Tabela 5 – Formato do ficheiro de saída.

Mod representa o módulo, Pha a fase em graus, Re a parte real e Im a parte imaginária das respectivas variáveis entre parênteses. I e J são os índices dos modos a que corresponde as variáveis dessa linha. Todas as variáveis de saída são adimensionais à exceção de PER , que são períodos de onda em segundos. Estes valores descrevem a resposta na forma espectral e encontram-se ordenados por ordem decrescente da variável PER . Assim, quando se opta pelo cálculo para diferentes modos de liberdade, os valores de saída encontram-se ordenados pelo valor de PER e desordenados para os diferentes modos de liberdade.

3.3 Gerador de malha

Como referido anteriormente, para os ficheiros de dados geométricos é necessário recorrer a um gerador de malha que discretize a superfície do corpo e que tenha como ficheiro de saída as coordenadas de todos os painéis, de acordo com a regra da normal exterior apresentada na secção anterior.

Para reduzir o número de parâmetros que influenciam a energia extraída, achou-se prudente fixar a geometria do flutuador. Optou-se por um cilindro com uma calote semiesférica na parte inferior. Na figura 3.3 é apresentada esta geometria com respectivo eixo coordenado utilizado ao longo deste estudo, onde H e D representam, respectivamente, a altura da parte cilíndrica e o diâmetro do flutuador.

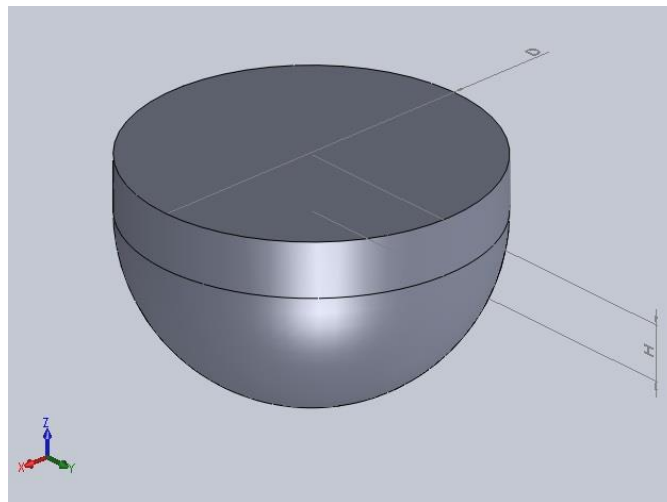


Figura 3.5 – Geometria do flutuador do dispositivo e respectivo sistema de eixos coordenados.

Recorreu-se a um código desenvolvido na linguagem *Python*, que permite a discretização de superfícies cilíndricas, calotes esféricas ou superfícies planas circulares.

O procedimento para a geração de malha passa pelas etapas seguintes:

1. Inicialmente deve optar-se pela geometria que se pretende discretizar inserindo o respectivo número:

```
-----
:      3D axisymmetrical grid generator      :
:      surface grid generator for WAMIT      :
-----

Choose a geometry to create:
<1> cylinder
<2> semi-sphere
<3> flat circle
<4> EXIT
```

Figura 3.6 – Escolha da geometria da superfície a discretizar.

2. Seguidamente consoante a geometria escolhida devem introduzir-se as seguintes variáveis:
Para discretizar superfícies cilíndricas (1):

```

:> 1
discretization z:
discretization theta:
r0:
l:
z0:

```

Figura 3.7 – Variáveis a introduzir para discretizar superfícies cilíndricas.

'Discretization z' e 'discretization theta' são o número de divisões da malha segundo z e Θ respectivamente. r_0 e l são o raio e a altura da superfície cilíndrica respectivamente. l deve ser inferior a 0 e a superfície cilíndrica é gerada para baixo do plano $z = z_0$.

Para superfícies semiesféricas (2) ou circulares num plano horizontal (3):

```

:> 2
discretization z:
discretization theta:
r0:
z0:

```

Figura 3.8 – Variáveis a introduzir para discretizar superfícies semiesféricas ou circulares num plano horizontal

'Discretization z' e 'discretization theta' são o número de divisões da malha segundo z e Θ respectivamente. r_0 é o raio da superfície semisférica/circular plana. A superfície semiesférica é gerada para baixo do plano $z = z_0$. No caso de ser uma superfície circular plana (3) está é gerada no plano $z = z_0$.

3. Para terminar a geração da malha deve escrever-se (4) para sair do programa.

Este programa gera um ficheiro de dados geométricos com todas as variáveis da(s) superfície(s) geométrica(s) escolhidas discretizadas, com a ordem e estrutura da tabela 4.

3.4 Ferramentas desenvolvidas em MATLAB

Foi criado um programa de tratamento dos dados obtidos através do WAMIT, utilizando a linguagem MATLAB. Como as variáveis de saída do WAMIT se encontram ordenadas pela frequência, quando escolhidos vários graus de liberdade, estas vão encontrar-se desordenadas. Este programa em MATLAB permite extrair dos ficheiros de saída as variáveis específicas (coeficientes de massa adicionada, amortecimento, forças de excitação, etc.) em função da frequência, agrupando em ficheiros separados para os diferentes modos. As variáveis ficam assim, organizadas e com fácil utilização para representações gráficas. As variáveis dimensionais são recuperadas. Nos ficheiros de saída do WAMIT os valores são adimensionais, à excepção dos períodos. O programa de tratamento de dados em MATLAB utiliza os valores da massa volúmica, da aceleração da gravidade, da amplitude de onda, dos períodos e do calado para dimensionalizar os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento, as forças de excitação e as respostas de amplitude e de velocidade. As adimensionalizações foram efectuadas utilizando:

Para a frequência angular não dimensional, ω^* , a seguinte equação [13],

$$\omega^* = \omega^2 \frac{d}{g} \quad (3.3)$$

Para o período adimensional, T^* , vem [13],

$$T^* = T^2 \frac{d}{g} \quad (3.4)$$

Para os coeficientes de massa adicionada dimensionais, A_{ij} , recorre-se a [13]:

$$A_{ij} = A_{ij}^* \cdot \rho \cdot L^p \quad (3.5)$$

em que L é comprimento característico do flutuador e p depende do modo. Para o modo 3, p assume um valor de 3.

Para coeficientes de amortecimento dimensionais, D_{ij} , utiliza-se [13]:

$$D_{ij} = D_{ij}^* \cdot \rho \cdot L^p \cdot \omega \quad (3.6)$$

Para forças de excitação dimensionais, F_i^E [13]:

$$F_i^E = F_i^{E*} \cdot \rho \cdot g \cdot L^{p-1} \quad (3.7)$$

Para a trajectória descrita por um corpo flutuante [13]:

$$FAD^*_i = \frac{\zeta_i}{A} \quad (3.8)$$

Onde A é a amplitude de onda e ζ_{ij} a amplitude do corpo flutuante.

E para a potência absorvida adimensional, P_A^* :

$$P_A^* = \frac{P_A}{P_{Amax}} \quad (3.9)$$

O *software WAMIT* calcula os coeficientes e forças hidrodinâmicos, a inclusão de outras forças exteriores como o dispositivo de extracção de energia é feita através de um programa desenvolvido em *MATLAB*, pelo autor. Neste programa importam-se os resultados do *WAMIT* que são combinados com as características dinâmicas do sistema de extracção obtendo-se as equações do movimento e a potência efectivamente extraída. Este código constitui uma ferramenta importante no estudo de um dispositivo de *PTO*, pois permite obter a potência extraída em condições optimizadas de agitação e para tecnologias bem determinadas. O estudo de um determinado parâmetro, ou a sua optimização pode assim, ser efectuado correndo várias vezes o programa e analisando os resultados.

4 Testes de Validação de Procedimentos

Neste capítulo pretende-se verificar se a utilização do código *WAMIT* e se o programa de tratamento de dados desenvolvido pelo autor em *MATLAB* é capaz de reproduzir resultados validados e publicados na bibliografia. Para tal recorre-se a situações semelhantes às que se pretende estudar nesta tese.

4.1 Descrição do Caso de Teste

Com o objectivo de validar a metodologia adoptada efectuou-se uma pesquisa bibliográfica com a finalidade de identificar resultados obtidos com o código *WAMIT* numa situação que envolvesse um corpo flutuante sobre a acção de uma onda monocromática. A escolha recaiu sobre o artigo [14] onde se apresenta um estudo experimental em canal de ondas e respectivas simulações numéricas (efectuadas com código *WAMIT*) de um modelo reduzido de um flutuador com simetria radial sujeito a movimentos de arfagem, avanço e cabeceio.

O corpo flutuante em estudo é composto por um cilindro de 0,15 m de diâmetro e 0,225m de altura e por uma calote esférica na parte inferior (figura 4.1). A massa do flutuador é de 2,272 kg e uma vez que o corpo é axissimétrico os momentos e produtos de inércia são:

$$I_{xy} = I_{yx} = I_{xz} = I_{zx} = I_{yz} = I_{zy} = 0, \quad I_{xx} = 0,03212 \text{ kg.m}^2,$$

$$I_{yy} = 0,0308 \text{ kg.m}^2 \text{ e } I_{zz} = 0,05139 \text{ kg.m}^2$$

A profundidade considerada nas simulações numéricas é de 0,35m (pois foi esta a profundidade do tanque de ondas utilizado para os ensaios experimentais).

Nesta publicação é fornecida muita informação quanto aos valores dos parâmetros utilizados nas simulações numéricas. Desta forma a comparação de resultados vai também servir para concluir sobre a conformidade das escolhas efectuadas pelo autor nomeadamente na discretização e opção do modelo numérico, mencionados em 3.2.2.

Em [14] apresentam-se resultados relativos a: frequências de oscilação natural, coeficientes de massa adicionada (A^*_{ij}) e de amortecimento (D^*_{ij}), força de excitação (F_i^{E*}) e factor de amplificação dinâmica (FAD^*_i) para os modos (de acordo com a figura 2.8) de avanço-recuo (1), arfagem (3) e cabeceio (5).

A forma hidrodinâmica do flutuador provoca o acoplamento entre os movimentos de avanço-recuo e de cabeceio. O acoplamento entre os movimentos de cabeceio e avanço-recuo deve-se ao facto de que uma rotação em cabeceio provoca um avanço ou recuo do centro e massa do flutuador.

Assim os coeficientes hidrodinâmicos (massa adicionada e amortecimento) são calculados para modos cruzados pois nos ensaios experimentais o movimento do flutuador não se encontrava restringido nestes graus de liberdade.

No referido artigo, a superfície do corpo foi discretizada através de 640 painéis, enquanto nas simulações efectuadas pelo autor, foi representada por 2040 painéis. Na figura 4.1 apresentam-se as malhas de discretização utilizadas em [14] e neste estudo.

Na discretização foi dada especial atenção aos painéis que incluem o ponto inferior da calote esférica, pois estes painéis têm de ser triangulares e são de reduzida dimensão. O WAMIT obriga a uma dimensão mínima nestes painéis o que pode gerar uma mensagem de erro o que implica a uma nova discretização.

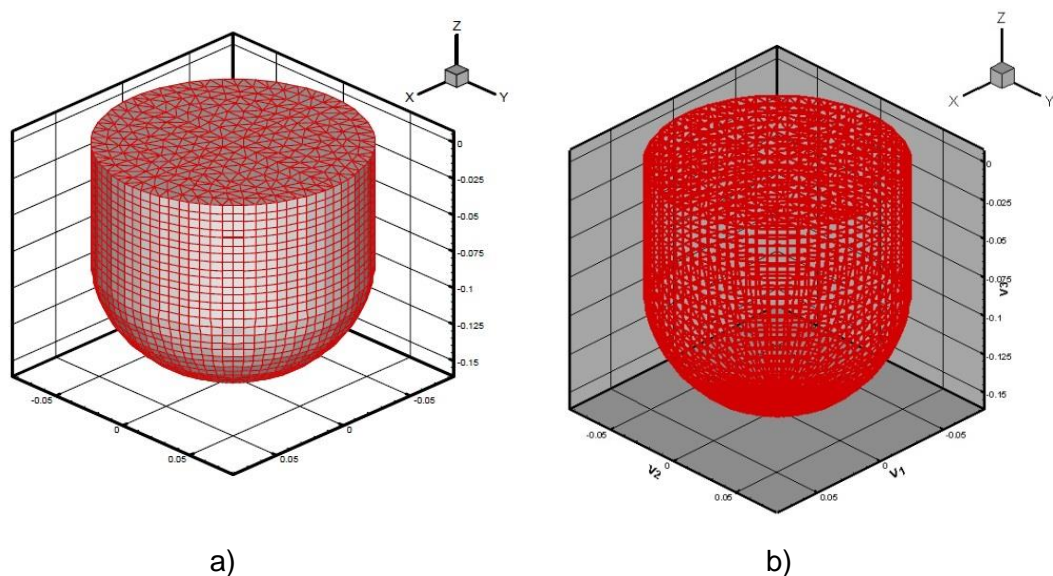


Figura 4.1 – Representação das malhas utilizadas: a) em [14]; b) pelo autor.

Nas secções seguintes comparam-se os resultados relativos às frequências de oscilação natural, aos coeficientes de massa adicionada (A^*_{ij}), amortecimento (D^*_{ij}), à força de excitação (F_i^{E*}) e o ao factor de amplificação dinâmica (FAD^*_i) para os modos de avanço-recuo (1), arfagem (3) e cabeceio (5).

4.2 Coeficientes de Massa Adicionada

Os coeficientes de massa adicionada são comparados na figura 4.2, onde o eixo das abcissas representa a frequência angular adimensional (ω^*) e o eixo das ordenadas representa o coeficiente de massa adicional adimensional (A^*_{ij}), para os diferentes graus de liberdade.

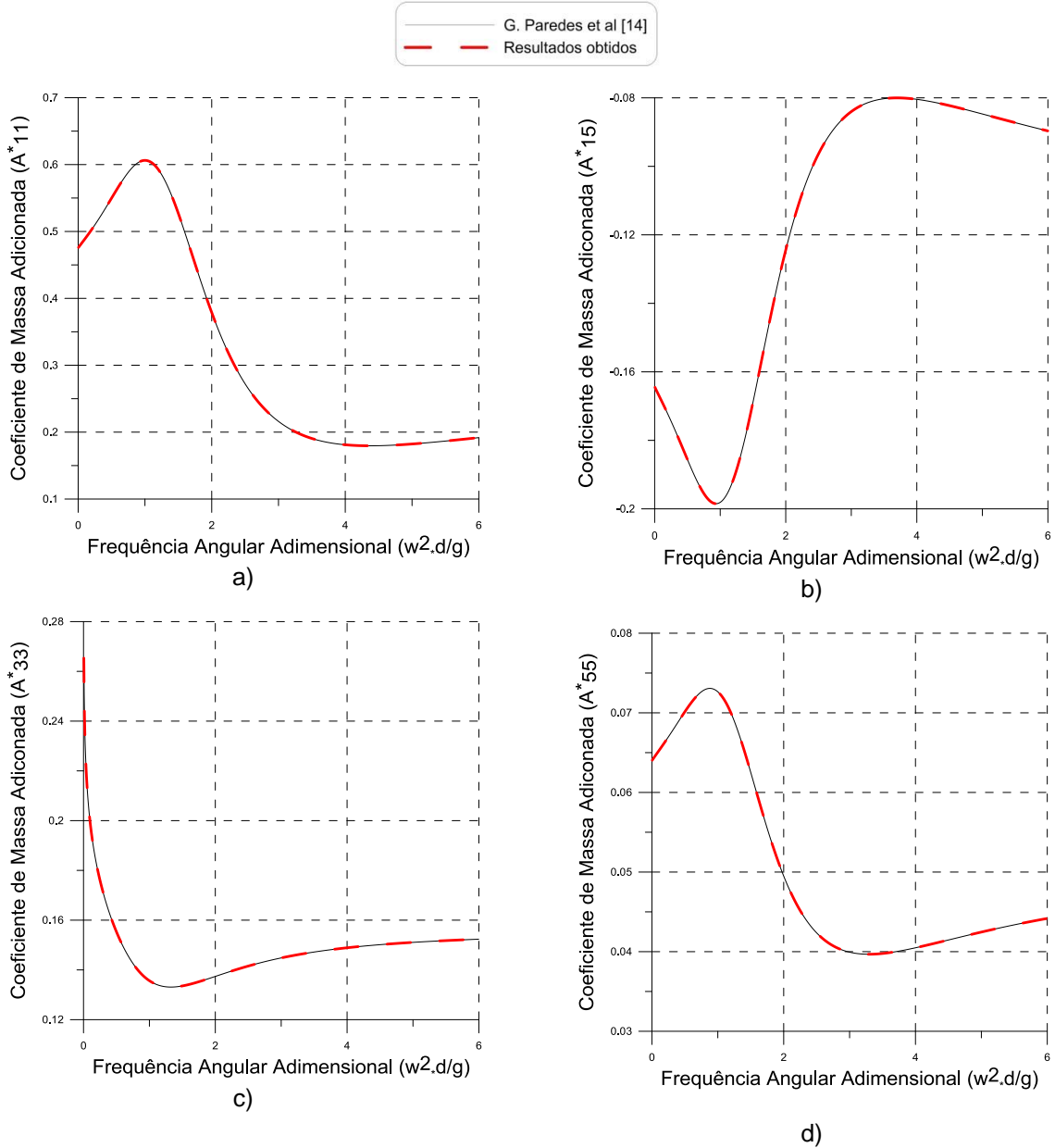


Figura 4.2 – Coeficiente de massa adicionada adimensional para os modos: a) 11 (A^*_{11}); b) 15 (A^*_{15}); c) 33 (A^*_{33}); d) 55 (A^*_{55}).

Tal como se pode observar os resultados obtidos para os coeficientes de massa adicionada são muito semelhantes aos resultados apresentados em [14] o que sugere que os procedimentos foram correctos e que os resultados são independentes da malha.

Note-se que os coeficientes de massa adicionada para o modo de avanço são superiores aos do modo de arfagem o que está de acordo com a intuição física pois a aceleração do corpo na direcção horizontal “transporta mais massa” que na direcção vertical. O mesmo princípio físico justifica o baixo valor para o movimento de cabeceio.

Os coeficientes de massa adicionada cruzados entre os modos avanço-recuo (1) e cabeceio (5) são negativos, isto significa que, a ocorrência simultânea destes dois modos provoca um arrastamento de fluido inferior ao que se obteria no caso de estes modos ocorrerem isoladamente.

Para o modo 11 nota-se que o coeficiente de massa adicionada é mínimo para a frequência de oscilação adimensional de 4. Para o modo 15 observa-se que o coeficiente de massa adicionada é mínimo para a frequência adimensional de 1. Para o modo 33 é possível observar que o coeficiente de massa adicionada é mínimo para frequências perto de 1. Para o modo 55 o mínimo ocorre para frequências de 3.

4.3 Coeficientes de Amortecimento

Os coeficientes de amortecimento por radiação são neste contexto muito importantes pois, uma geometria com boas características de absorção de ondas tem, necessariamente, uma boa capacidade de radiação de ondas.

Os gráficos dos coeficientes de amortecimento são comparados na figura 4.3, onde o eixo das abscissas representa a frequência angular adimensional (ω^*) e o eixo das ordenadas representa o coeficiente de amortecimento adimensional (D^*_{ij}), para os diferentes graus de liberdade.

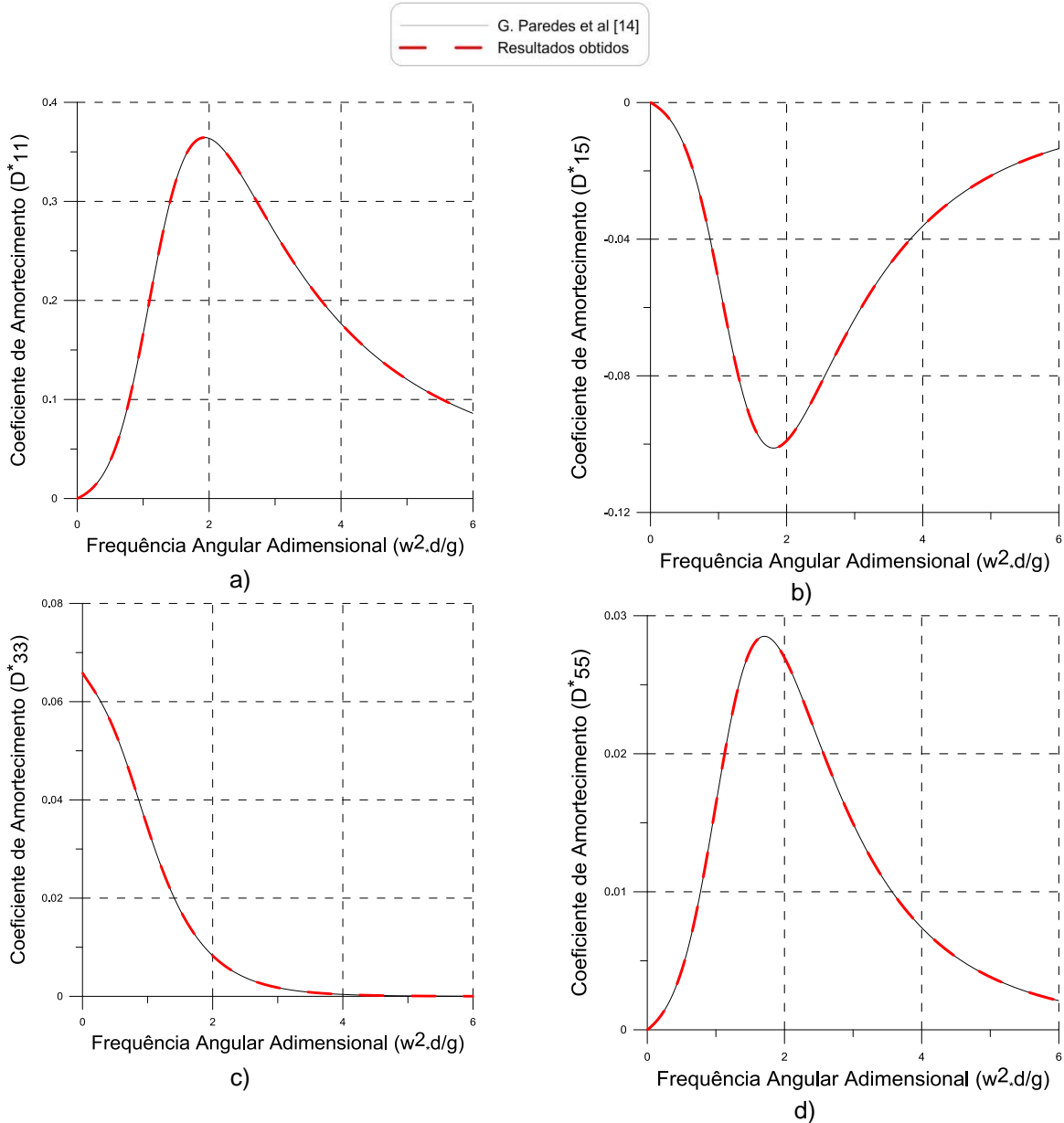


Figura 4.3 – Coeficiente de amortecimento adimensional para os modos: a) 11 (D^*_{11}); b) 15 (D^*_{15}); c) 33 (D^*_{33}) e d) 55 (D^*_{55}).

As curvas dos coeficientes de amortecimento para todos os modos iniciam-se em zero e tendem para zero quando o flutuador se encontra sujeito a elevadas frequências de oscilação. Esta evolução é coerente com a física do fenómeno pois para muito baixas frequências a velocidade do corpo relativamente à superfície livre é muito pequena, não

perturbando os campos de pressões e de velocidade e consequentemente não gerando ondas. Para muito altas frequências o comprimento característico do corpo será de ordem de grandeza superior ao comprimento de onda gerada pelo que a geração é ineficaz.

Note-se que o coeficiente relativo ao avanço é superior ao de arfagem e ao de cabeceio. Desta forma o corpo radia ondas de maior dimensão quando é movimentado na direcção horizontal do que quando esse movimento é vertical ou de rotação. O valor negativo para o coeficiente cruzado acarreta uma redução da energia radiada nos outros modos.

A coerência física e a elevada semelhança com os resultados de [14] permitem afirmar que os efeitos de amortecimento foram correctamente simulados.

4.4 Coeficientes da Força de Excitação

Os bons resultados conjuntos para os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento demonstram que os efeitos de radiação são correctamente calculados. Nas próximas secções verificam-se os efeitos da difracção. A força de excitação é caracterizada através do módulo e da fase.

4.4.1 Módulo da Força de Excitação

Na figura 4.4, o eixo das abcissas representa a frequência angular adimensional (ω^*) e o eixo das ordenadas representa o coeficiente do módulo da força de excitação adimensional (F_l^E), para os diferentes graus de liberdade.

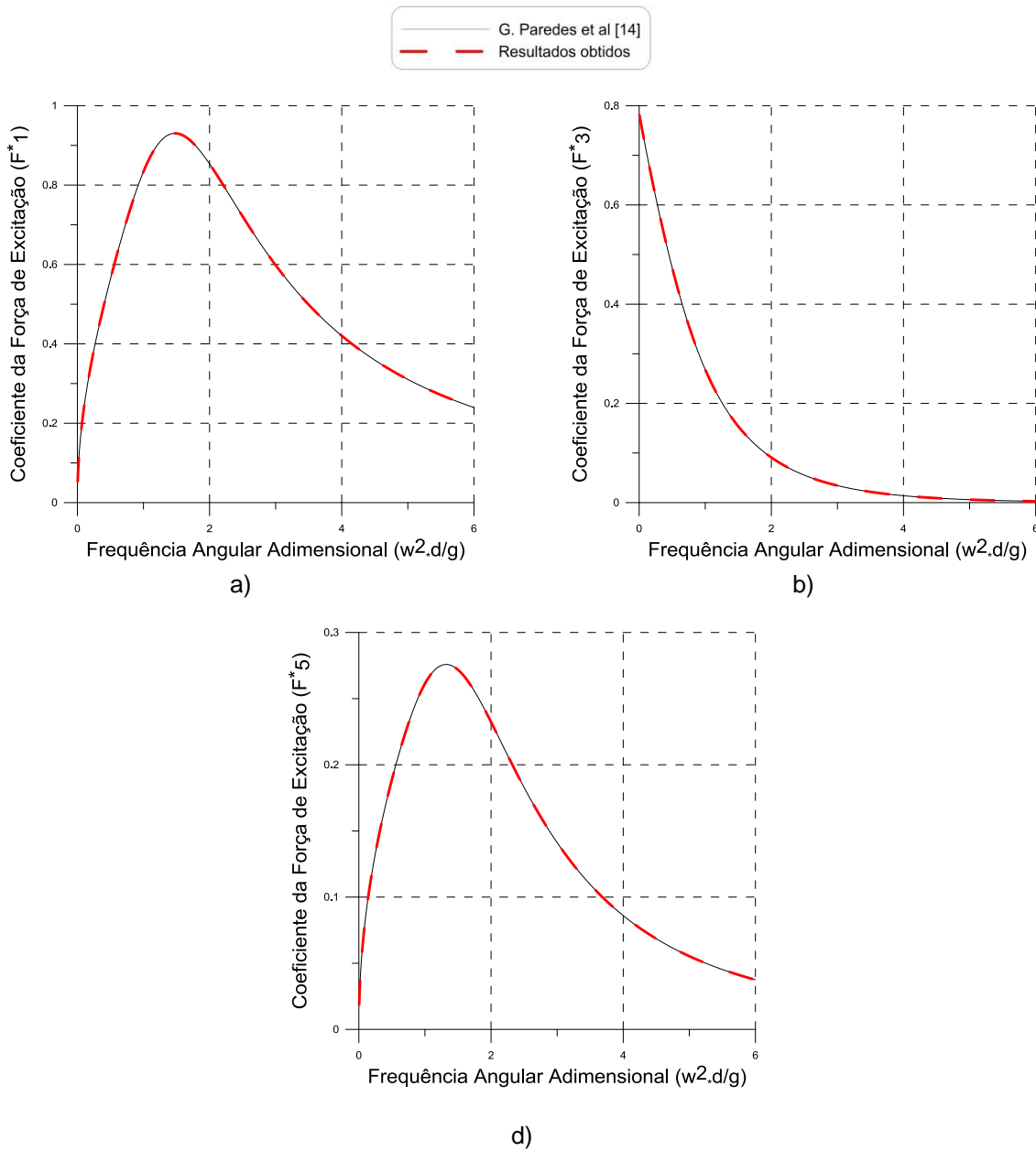


Figura 4.4 – Coeficiente do módulo da força de excitação adimensional para os modos: a) 1 (F_1^E); b) 3 (F_3^E) e c) (F_5^E).

Relativamente ao modo de arfagem, a baixas frequências a força de excitação tende para a força de restituição hidrodinâmica. Para as altas frequências o flutuador é excitado por ondas com comprimentos menores que a sua dimensão característica (diâmetro) resultando uma anulação do gradiente de pressão na superfície inferior do corpo e consequentemente força vertical praticamente nula.

Quanto aos coeficientes relativos à força horizontal (correlacionada com o movimento de avanço) e momento (correlacionado com o cabeceio) são nulos para baixas frequências. Para baixas frequências o corpo perturba pouco o escoamento assim a força (ou o momento) de excitação corresponde à integração da pressão do campo de ondas na superfície molhada (força de *Froude-Kyrlov*). Sendo o comprimento de onda muito superior ao comprimento característico do corpo a integração da pressão dinâmica conduz a um valor aproximadamente nulo.

As excitações tendem para zero quando o flutuador se encontra sujeito a frequências de oscilação muito elevadas, para todos os modos. Para o modo 1 (avanço) é máxima para valores de frequência adimensional perto de 1,5. A excitação para o modo 5 tende para zero quando o flutuador se encontra sujeito a frequências de oscilação muito elevadas. Esta é máxima para valores da frequência adimensional perto de 1,5.

4.4.2 Fase entre a Força de Excitação e a da Onda Incidente

Na figura 4.5, o eixo das abcissas representa a frequência angular adimensional (ω^*) e o eixo das ordenadas representa a fase entre a força de excitação e a onda incidente (φ_i^*), em graus, para os diferentes graus de liberdade.

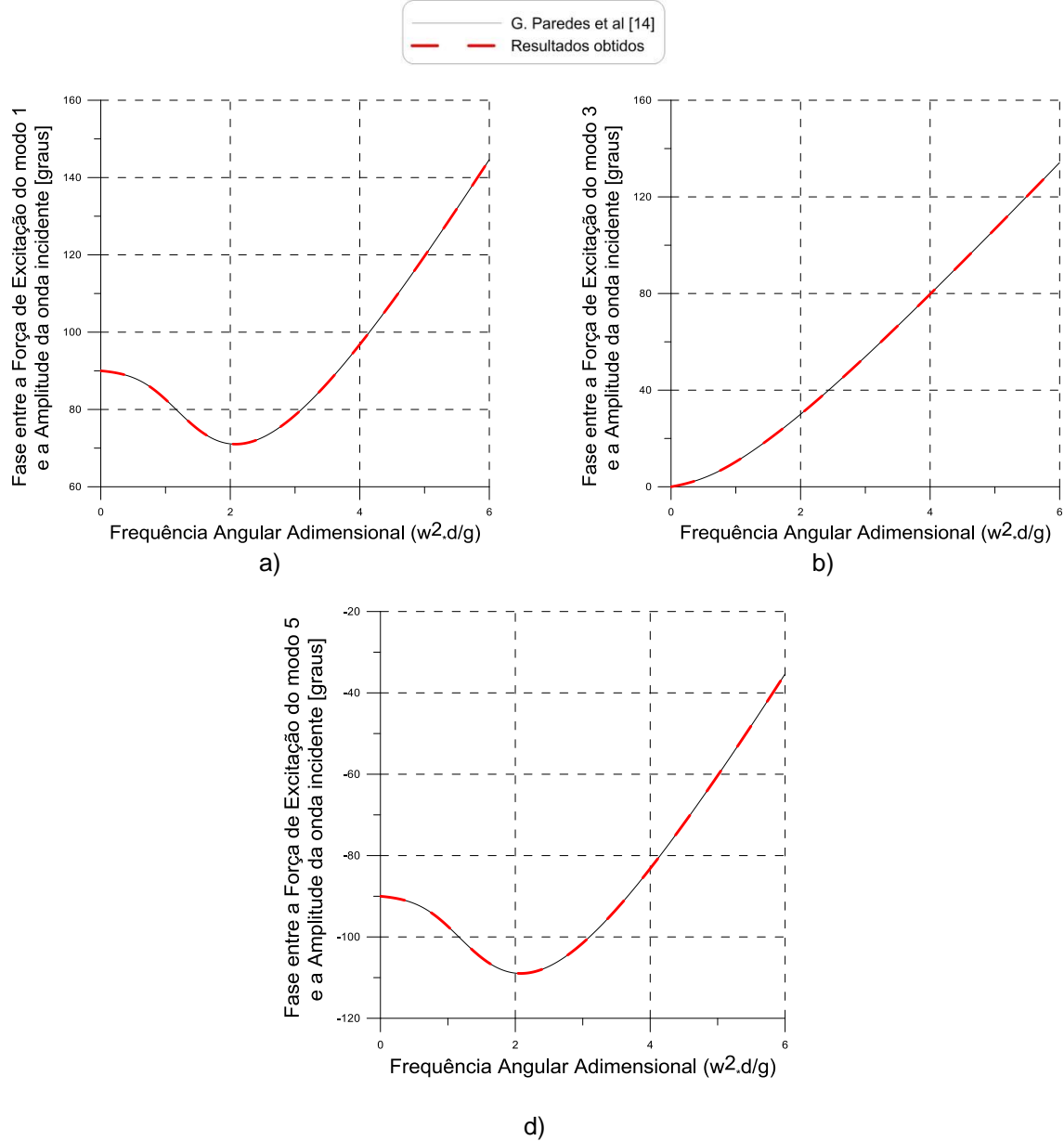


Figura 4.5 – Fase entre a força de excitação e a amplitude da onda incidente, em graus, para os modos: a) 1 (φ_1); b) 3 (φ_3) e c) (φ_5).

Para frequências de oscilação baixas a fase entre a força de excitação e a amplitude da onda incidente para o modo 3 é 0, pois o corpo é pontual relativamente ao comprimento de onda. Assim, a força vertical é a força de *Froude-Kyrlov*, portanto a integração da pressão, estando esta em fase com a onda incidente (equação 2.8).

Também para frequências muito baixas a fase entre a força de excitação e a amplitude da onda incidente para o modo 1 e para o modo 5 é de -90° .

A coerência dos resultados obtidos para a excitação permite concluir que o problema de difracção foi bem simulado.

4.5 Factor de Amplificação Dinâmica

O factor de amplificação dinâmica pode ser definido pelo módulo e fase ou pela parte real e imaginária. Neste estudo, este é definido através do módulo e da fase.

4.5.1 Módulo do Factor de Amplificação Dinâmica

Na figura 4.6 o eixo das abcissas representa a frequência angular adimensional (ω^*) e o eixo das ordenadas representa o factor de amplificação dinâmica (FAD^*_i), para os diferentes graus de liberdade.

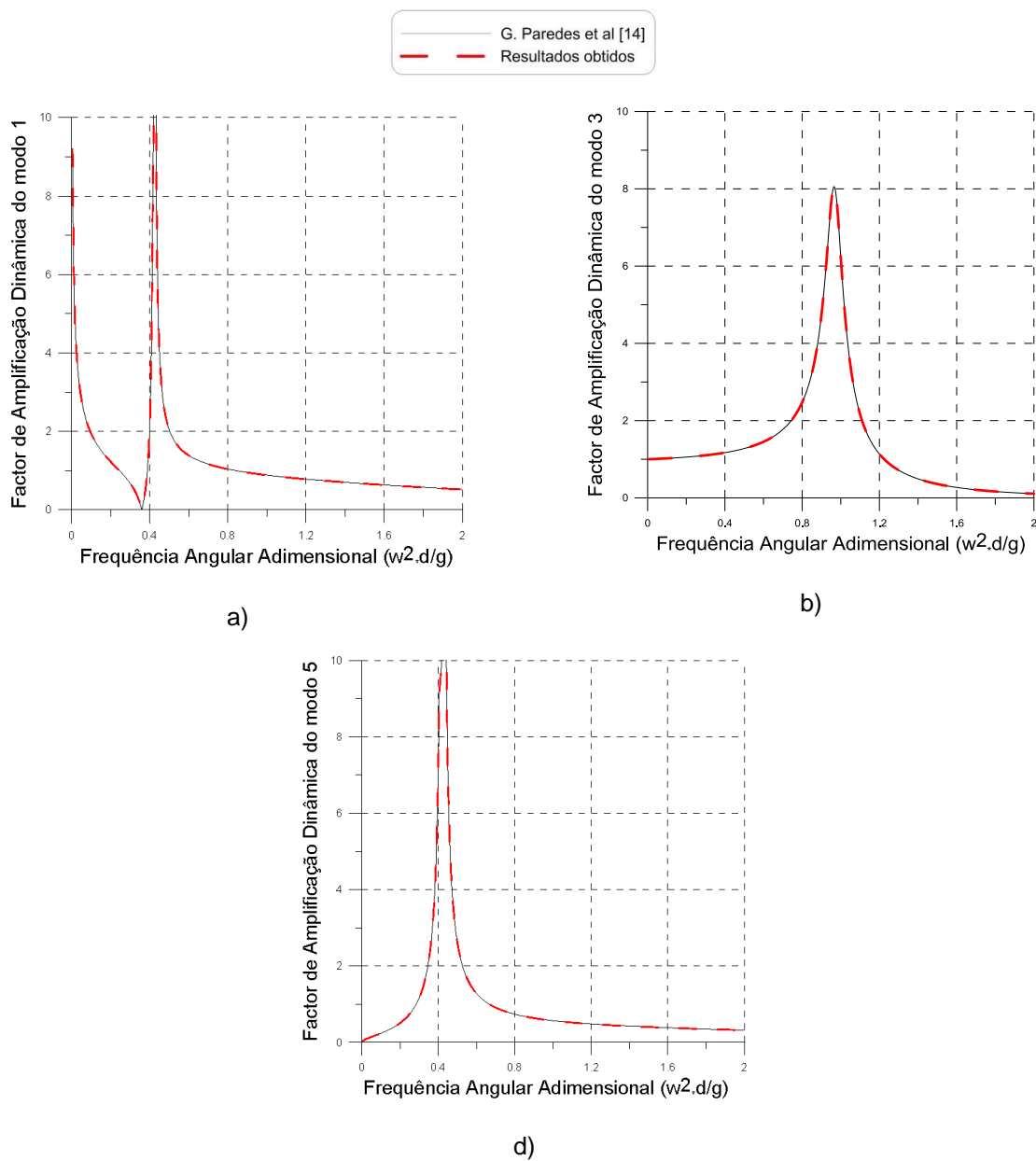


Figura 4.6 – Factor de amplificação dinâmica para os modos: a) 1 (FAD^*_1); b) 3 (FAD^*_3) e c) 5 (FAD^*_5).

Para frequências de oscilação muito elevadas o factor de amplificação dinâmica para os três modos tende para 0, pois o corpo, devido à sua inércia, deixa de responder à onda.

Para frequências de oscilação reduzidas a amplitude do movimento de arfagem tende para a amplitude da onda, deste modo o factor de amplificação dinâmica tende para 1. O valor máximo da amplitude, para este modo, é oito vezes a amplitude da onda incidente e corresponde a um comportamento ressonante.

O acoplamento entre os movimentos de avanço-recuo (1) e cabeceio (5) reflecte-se nos resultados relativos aos respectivos factores de amplificação dinâmica, que têm o mesmo período de pico. O factor de amplificação dinâmica para o cabeceio tende para 0, para frequências muito baixas o que indica que o corpo deixa de rodar para ondas muito longas.

A diferença entre os períodos de pico para os modos de avanço (ou cabeceio) e para o de arfagem deve-se às diferenças das respectivas massas adicionadas que evidentemente implicam diferentes frequências de oscilação natural.

4.5.2 Fase entre o Factor de Amplificação Dinâmica e Amplitude da onda Incidente

Na figura 4.7 o eixo das abcissas representa a frequência angular adimensional (ω^*) e o eixo das coordenadas representa a fase entre a resposta e a onda incidente (θ^*_{ij}), em graus, para os diferentes graus de liberdade.

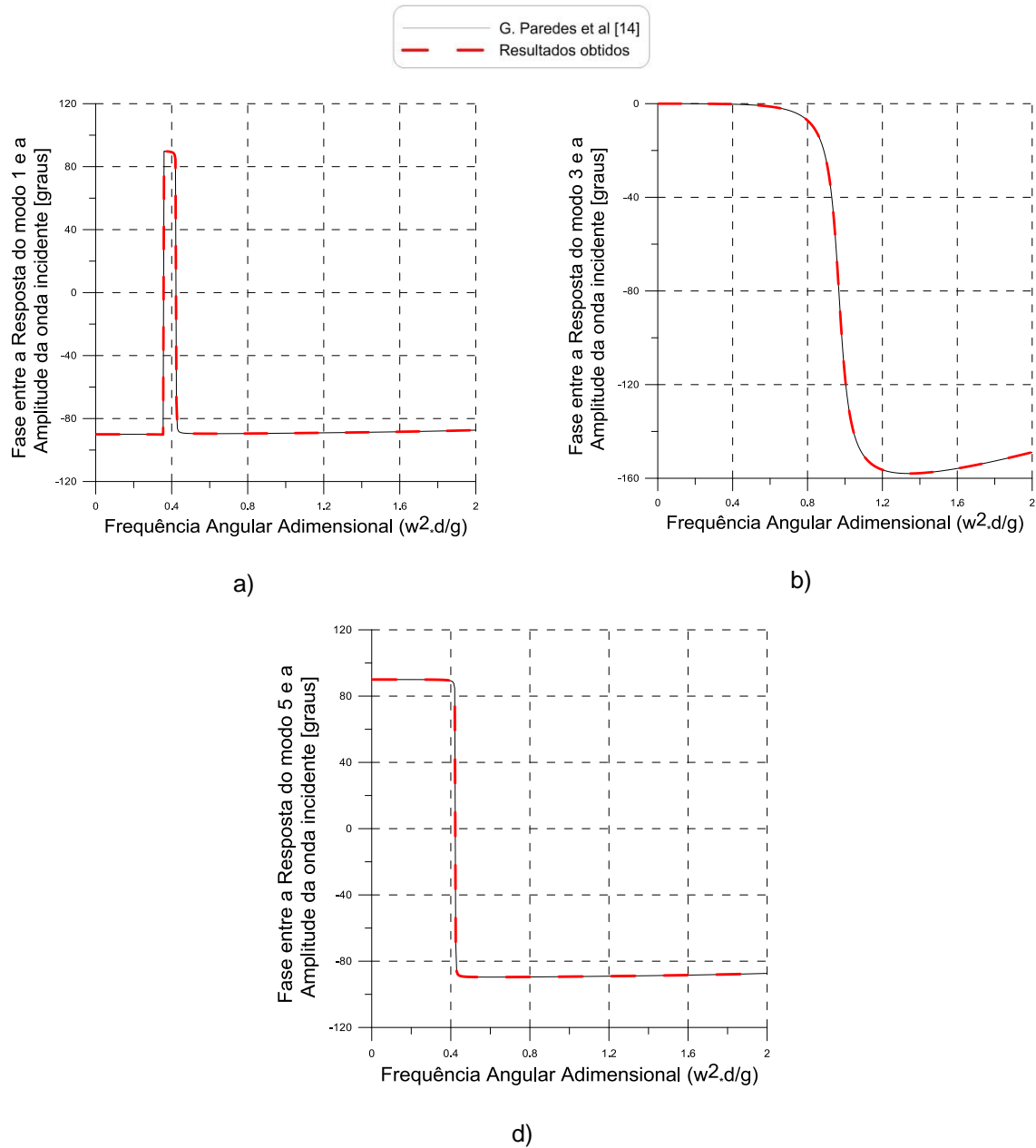


Figura 4.7 – Fase entre a resposta e a onda incidente para os modos: a) 1 (θ_1); b) 3 (θ_3) e c) 5 (θ_5).

Para o modo de arfagem observa-se que o pico do factor de aplicação dinâmica coincide com uma diferença de fase de -90° , o que é coerente com o comportamento ressonante do corpo. Para baixas frequências a fase é de 0° pois o corpo acompanha a onda incidente.

Tal como para o modo de arfagem, para os modos de avanço e cabeceio o comportamento ressonante correlaciona-se com a variação da fase do movimento.

Os resultados foram coincidentes com os publicados em [14] considerando que a ferramenta numérica desenvolvida consegue simular o corpo flutuante com rigor e precisão.

Com esta validação conclui-se ainda que a discretização do corpo foi efectuada com um elevado número de painéis, 2040, pois em [14] obteve-se resultados idênticos utilizando apenas 640 painéis.

5 Resultados Numéricos

Este capítulo inicia-se com a caracterização em frequência, amplitude e energia da agitação marítima com o objectivo de poder quantificar a gama de excitações a que o sistema poderá estar sujeito e assim otimiza-lo.

Seguidamente estuda-se a influência da massa, calado e diâmetro na frequência de oscilação natural para um flutuador livre.

Por fim, é acoplado um sistema de *PTO*, variando-se o diâmetro e o comprimento característico de vários flutuadores identifica-se qual o mais eficaz para um dado estado do mar.

5.1 Caracterização do Estado de Mar

Nesta secção exemplifica-se como caracterizar o recurso energético utilizando para tal dados obtidos por uma bóia ondógrafo, colocada no grupo central dos Açores. Aplicação de *software* específico [15] às series temporais obtidas pelo ondógrafo permite obter a distribuição espectral da altura significativa² das ondas.

Na tabela 6 são apresentadas as densidades de probabilidade de ocorrência dos diferentes estados de mar, assinalando-se os mais prováveis.

$T_e (s) \backslash H_s (m)$	< 7	7-8	8-9	9 – 10	10 – 11	11 – 12	12 – 13	13 – 14	> 15
0 – 0.5		0,1		0,1					
0.5 – 1.0		0,8	1,1	0,6	1	0,4			
1.0 – 1.5	0,1	0,9	3,7	4,2	2	0,9	0,3		
1.5 – 2.0			2	4,4	9,1	5,6	0,4		
2.0 – 2.5		0,7	0,1	4,2	6,4	4,3	1,2		
2.5 – 3.0		0,2		0,6	5,2	9,8	2		0,5
3.0 – 3.5			0,2		4,7	10,3	3,6		
3.5 – 4.0			0,2			1,4	1,6		
4.0 – 4.5				0,9	1	0,6	0,6	1	0,8

Tabela 6 – Densidade da probabilidade para diferentes estados do mar [16].

O fluxo de energia em kW por metro de frente de onda, em função da altura significativa e do período é dado por [16]:

$$F = 0,49 H_s^2 T_e \left[\frac{kW}{m} \right] \quad (5.1)$$

² A altura significativa representa a média do terço das maiores ondas da amostra.

Aplicando a equação 5.1, são calculados os fluxos de energia (tabela 7), de modo a quantificar a energia que será possível extrair nestes estados do mar.

$T_e(s) \backslash H_s(m)$	< 7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	> 15
0-0.5		0,2		0,2					
0.5-1.0		2,1	1,82	2,1	1,8	2,1			
1.0-1.5	5	5,8	5,05	5,8	5,1	5,9	5,2		
1.5-2.0			9,9	11,4	10,1	11,6	10,2		
2.0-2.5		18,6	16,4	18,9	16,6	19,1	16,9		
2.5-3.0		27,8		28,2	24,8	28,5	25,2		25,6
3.0-3.5			34,2		34,7	39,9	35,2		
3.5-4.0			45,5			53,6	46,9		
4.0-4.5				67,3	59,3	68,2	60,2	69	61,1

Tabela 7 – Fluxo de energia existente para diferentes estados do mar em kw/m.

Obviamente conclui-se que os estados do mar com maior probabilidade de ocorrência, nem sempre são os estados que apresentam maior fluxo energético.

É vantajoso um dispositivo que esteja em ressonância quando submetido a estados de mar satisfatoriamente energéticos e cuja probabilidade de ocorrência seja grande.

Deste modo, o produto das densidades de probabilidade (tabela 6) por o fluxo de energia (tabela 7) corresponde a uma variável estatística (tabela 8) que permite identificar os estados do mar mais apropriados para os quais se pretende projectar e otimizar o dispositivo.

$T_e(s) \backslash H_s(m)$	< 7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	> 15
0-0.5		0,02		0,02					
0.5-1.0		1,68	2,002	1,26	1,8	0,84			
1.0-1.5	0,5	5,22	18,685	24,36	10,2	5,31	1,56		
1.5-2.0			19,8	50,16	91,91	64,96	4,08		
2.0-2.5		13,02	1,64	79,38	106,24	82,13	20,28		
2.5-3.0		5,56		16,92	128,96	279,3	50,4		12,8
3.0-3.5			6,84		163,09	410,97	126,72		
3.5-4.0			9,1			75,04	75,04		
4.0-4.5				60,57	59,3	40,92	36,12	69	48,88

Tabela 8 – Indicador da potência associada ao estado de mar.

Para o exemplo apresentado, deve dimensionar-se o flutuador para que o seu comportamento ressonante ocorra na gama de períodos de 11 ou 12 segundos, ou seja, frequências entre 0,52 e 0,57 rad/s.

5.2 Influência da Massa

Segundo [10], para flutuadores cilíndricos livres cujo calado seja muito maior que o diâmetro a sua frequência de oscilação natural é independente do diâmetro e é determinada por:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{L}} \text{ para } L \gg D \quad (5.2)$$

Pretendendo-se estudar a dependência da frequência de oscilação natural com o diâmetro para flutuadores compostos por um cilindro e uma calote esférica, efectuou-se um conjunto de ensaios em que se variou o calado e o diâmetro.

A condição de equilíbrio de um corpo flutuante implica que o peso do flutuador seja igual à força de impulsão.

$$P = I \Leftrightarrow m \cdot g = \rho \cdot g \cdot V \Leftrightarrow m = \rho \cdot V \quad (5.3)$$

onde P representa o peso do corpo, I a força de impulsão da água sobre o corpo e V o volume do flutuador que se encontra submerso e é dado por:

$$V = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 + \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 H \quad (5.4)$$

em que D representa o diâmetro do flutuador e H a altura da parte cilíndrica submersa do flutuador. O calado, L , é então definido por:

$$L = H + \frac{D}{2} \quad (5.5)$$

Desta forma, o estudo da influência do calado sobre a frequência natural é equivalente ao estudo da influência da massa do flutuador. Ou seja, o aumento da massa do flutuador, mantendo o diâmetro constante, implica o aumento do seu volume submerso, aumentando o calado.

Na figura 5.1 está representada a influência massa no flutuador (via calado) na frequência de oscilação natural, rad/s.

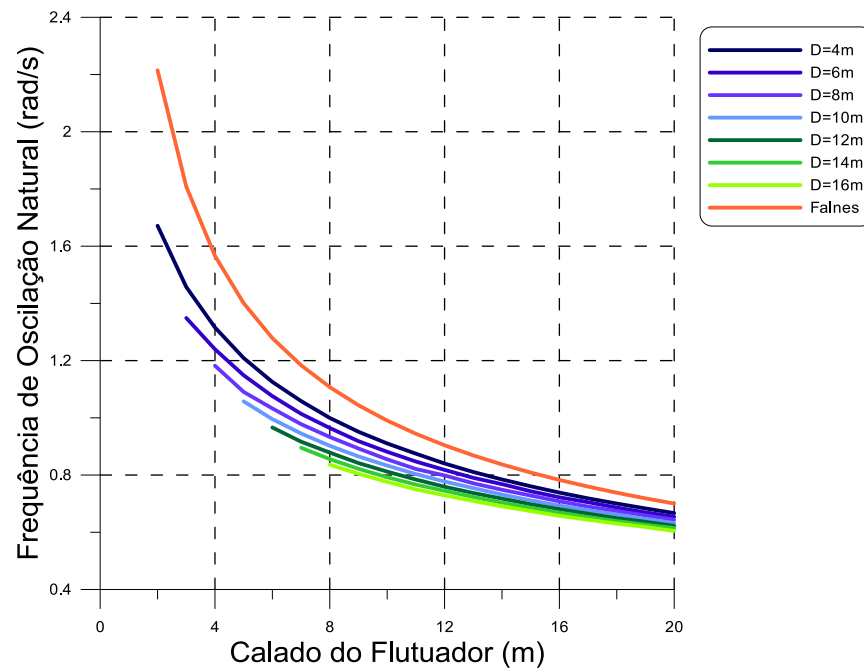


Figura 5.1 – Frequência de oscilação natural em função do calado.

Para o mesmo diâmetro, quanto maior a massa, menor será a frequência de oscilação natural. As curvas não se iniciam todas na mesma abcissa porque, os calados mínimos, para cada diâmetro, correspondem à situação em que apenas a calote esférica está imersa.

Quanto menor a massa, maior é a influência do diâmetro na variação da frequência de oscilação natural. Ou seja, para flutuadores com massas pequenas é possível ajustar a condição de ressonância variando o diâmetro.

Para flutuadores com calote esférica e com massas grandes (e consequentemente $L \gg D$) observa-se que a frequência de oscilação natural vai-se tornando independente do diâmetro do flutuador, recuperando-se o resultado de 5.2.

5.3 Influência do Diâmetro

Na secção anterior verificou-se a influência do calado na frequência de oscilação natural. Importa agora concluir qual a influência do diâmetro em situações em que este seja maior que o calado. Efectuou-se uma bateria de ensaios em que se variou o diâmetro do flutuador e identificou-se a frequência natural. O gráfico da figura 5.2 ajuda também no pré-dimensionamento de um flutuador de baixo calado.

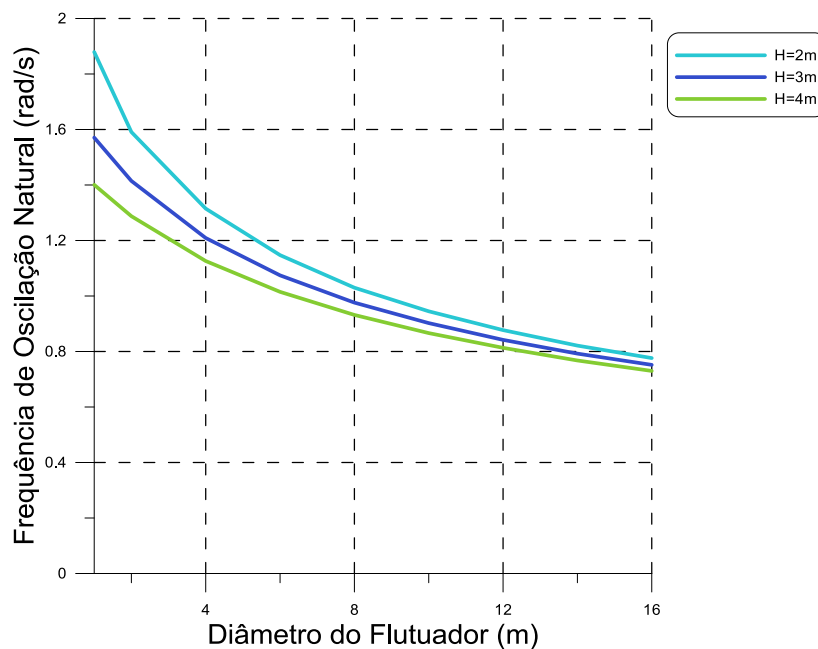


Figura 5.2 - Frequência de oscilação natural em função do diâmetro do flutuador.

Na interpretação desta figura convém recordar que o aumento do diâmetro implica um aumento do volume, e consequentemente da massa do flutuador.

Observa-se que para o mesmo calado, quanto maior o diâmetro menor é a frequência de oscilação natural do flutuador.

Nestas duas secções verificou-se que o ajustamento da frequência de ressonância deve ser feito com o calado sempre, porque o diâmetro aumenta a massa mas também a restituição hidrostática.

5.4 Sistema em arfagem com PTO

Nesta secção considera-se um sistema composto por um flutuador acoplado a um sistema de extracção (PTO) sendo as deslocações verticais as únicas não restringidas.

Como o sistema de PTO tem um efeito de amortecimento no movimento do flutuador, é de prever que, a frequência de oscilação para a qual o flutuador se encontra em ressonância será menor que a frequência para o mesmo flutuador livre. Ou seja, como o flutuador se encontra sujeito a um amortecimento adicional, a sua frequência de ressonância deve diminuir ainda que de forma reduzida.

Na secção 2.5 foram apresentados os modelos matemáticos que descrevem o movimento de arfagem do sistema flutuador com PTO, tendo-se concluído que as suas características extractivas óptimas ocorrem quando:

$$(K_{pto})_{optm} = -\omega^2 \cdot (m_F + A_{33}) - C_{33} \quad (2.71)$$

e amortecimento óptimas ocorrem quando:

$$(D_{pto})_{optm} = D_{33} \quad (2.72)$$

Como referido no capítulo 2, a potência absorvida é determinada pela equação:

$$P_A = P_E - P_R \quad (2.76)$$

Sendo a potência de excitação e a potência radiada determinadas por:

$$P_E = \frac{1}{2} \cdot |F^E| \cdot |\dot{\zeta}| \cdot \cos(\varphi_j) \quad (2.74)$$

$$P_R = \frac{1}{2} \cdot D \cdot |\dot{\zeta}|^2 \quad (2.75)$$

A velocidade é obtida através de:

$$\dot{\zeta}_3 = \frac{F_3^E}{(D_{33} + D_{pto}) + i \cdot \omega(M_{33} + A_{33}) - i \cdot \frac{(C_{33} + K_{pto})}{\omega}} \quad (2.70)$$

Conhecidas as características do flutuador e do PTO, este modelo permite calcular a potência absorvida.

No que se segue consideram-se três situações distintas. Na primeira utilizam-se os valores óptimos para D_{pto} e K_{pto} (secção 2.5.2) e compara-se a potência absorvida com a potência máxima obtida por [10]:

$$P_{Amax} = \frac{|F_3^E|^2}{8 \cdot D_{pto}} \quad (2.78)$$

Estas duas formas independentes de calcular a potência absorvida máxima constituem um importante teste para o modelo numérico desenvolvido, pois os valores obtidos devem ser idênticos.

Seguidamente efectuam-se simulações em que se pretende otimizar PTO para a frequência da agitação marítima e considerando sistemas de extracção com características

ajustáveis ou independentes da frequência. Na tabela 9 resume-se as condições do estudo efectuado.

<p>1) $D_{pto} = D_{33}$ e $K_{pto} = \omega^2 \cdot (m_F + A_{33}) - C_{33}$</p> <ul style="list-style-type: none"> • A potência é obtida recorrendo às duas condições óptimas para o amortecimento e para o efeito elástico do <i>PTO</i>.
<p>2) $D_{pto} = D_{33}$ e $K_{pto} = 0$</p> <ul style="list-style-type: none"> • A potência é determinada considerando um sistema capaz de funcionar na condição $D_{pto} = D_{33}$, para qualquer frequência de oscilação ou seja, capaz de ajustar o D_{pto} em função da frequência; • Sistema de <i>PTO</i> sem características elásticas.
<p>3) $D_{pto} = D_{33} \omega$ e $K_{pto} = 0$</p> <ul style="list-style-type: none"> • A potência é determinada considerando um mecanismo simples cujo amortecimento é constante (não depende da frequência). Escolhe-se para D_{pto} o valor determinado para a frequência correspondente à potência máxima identificada em 2); • Sistema de <i>PTO</i> sem características elásticas.

Tabela 9 – Condições para o cálculo da potência absorvida.

Na prática seria muito complexo construir de um mecanismo de *PTO* capaz de alterar os seus coeficientes de elásticos e de amortecimento em função da frequência de oscilação. No caso da componente elástica, ($K_{pto} = 0$) as condições óptimas implicam não só que dependa da frequência, como que em algumas situações tenha de ser negativo. Na prática, o *PTO* teria de estar dotado de molas e de atuadores. Sendo complicado projectar um sistema deste tipo opta-se por considerar que o *PTO* não tem componente elástica. No que diz respeito ao coeficiente de amortecimento existem geradores lineares que permitem, dentro de gamas restritas, variar as suas características dinâmicas em função da frequência. Assim, opta-se por considerar que o *PTO* poderá variar o seu amortecimento com a frequência.

A adaptação de um flutuador ao recurso energético local implica que a energia máxima absorvida ocorra para a gama de frequências a que corresponde maior energia espectral. No estudo que se segue optimiza-se o flutuador para um estado de mar caracterizado na tabela 8. Estas frequências devem estar compreendidas entre 0,52 e 0,57 rad/s. A inexistência de componentes elásticas no *PTO* provoca que alteração nas suas características oscilatórias tenha de ser feita ou variando a sua massa ou o seu coeficiente de amortecimento (D_{pto}).

São escolhidos diferentes flutuadores, variando o diâmetro e o calado, de modo a tentar obter um flutuador, cuja frequência de oscilação para a qual a potência absorvida é máxima, se encontre na gama de frequências pretendido.

A potência de absorção é adimensionalizada recorrendo à equação

$$P_A^* = \frac{P_A}{P_{Amax}} \quad (3.9)$$

Onde P_{Amax} é obtida através da equação 2.78. Esta adimensionalização implica que as simulações numéricas nas condições óptimas de absorção (caso 1 da tabela 9) conduzam sempre ao valor unitário (curvas a verde nas figuras 5.3 a 5.5) constituindo um importante teste de validação da ferramenta numérica após a introdução do *PTO*. Estas curvas permitem ainda comparar a energia extraída nos restantes casos com a energia máxima.

Nas figuras 5.3 a 5.5 representa-se a potência absorvida adimensional, para sistemas com flutuadores de diâmetros entre 38-44m e com alturas entre 8-12m, em função da frequência de oscilação.

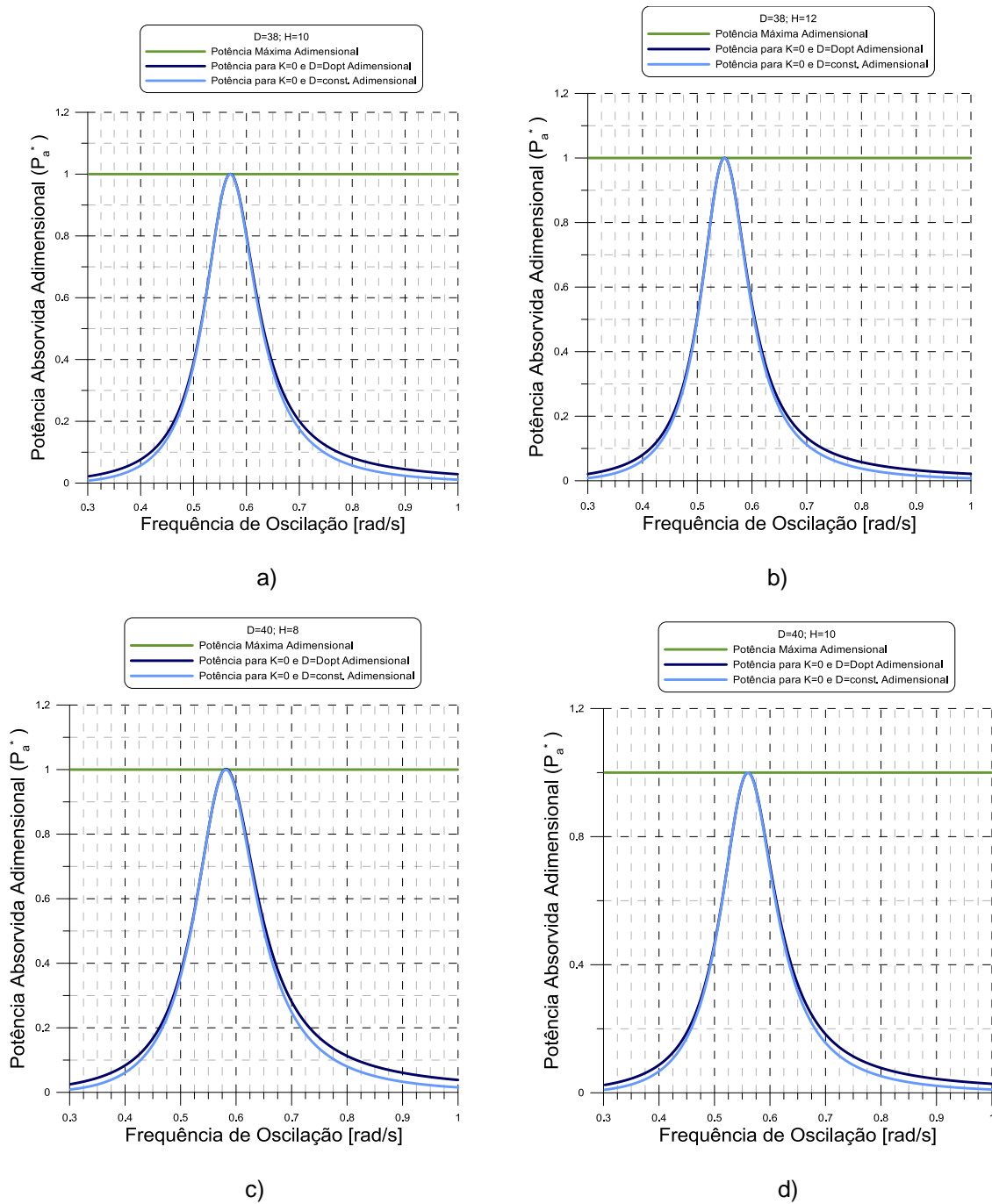
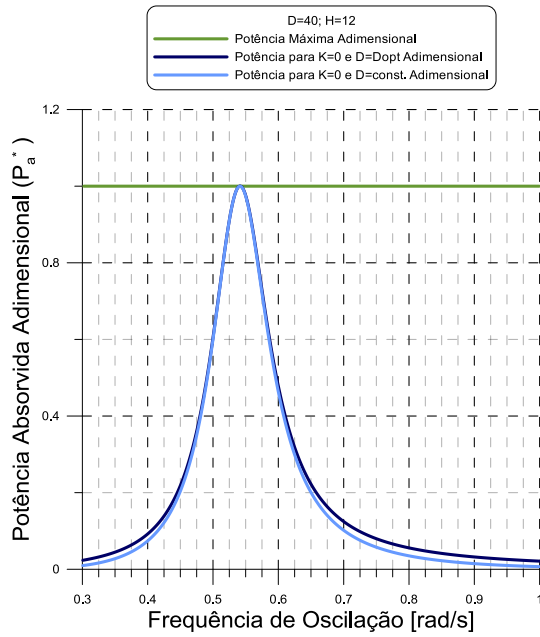
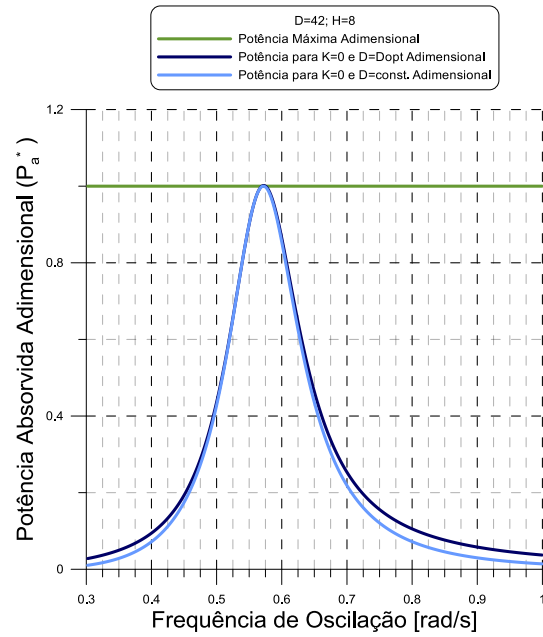


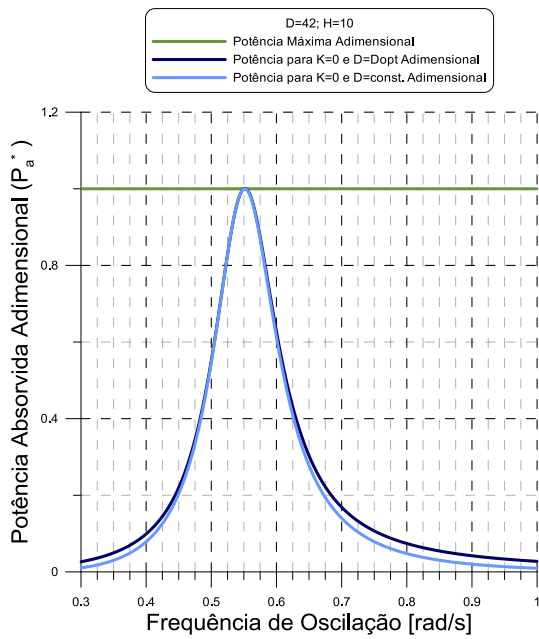
Figura 5.3 – Potência absorvida adimensional em função da frequência de oscilação para os casos 1, 2 e 3. Flutuadores: a) D=38 e H=10; b) D=38 e H=12; c) D=40 e H=8; d) D=40 e H=10.



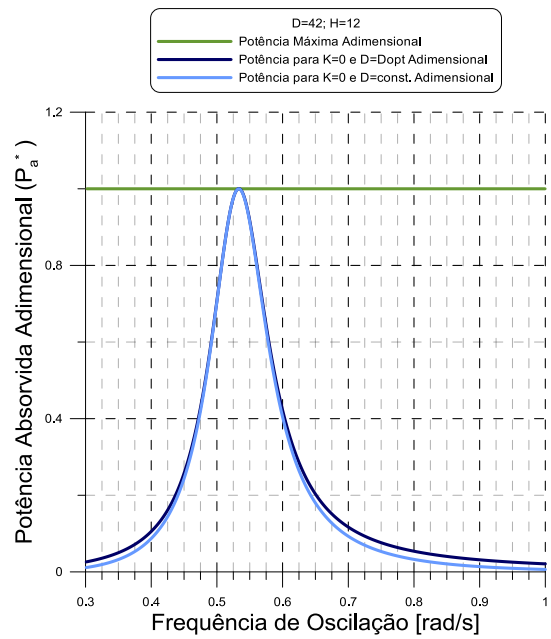
a)



b)



c)



d)

Figura 5.4 – Potência absorvida adimensional em função da frequência de oscilação para os casos 1, 2 e 3. Flutuadores: a) $D=40$ e $H=12$; b) $D=42$ e $H=8$; c) $D=42$ e $H=10$; d) $D=42$ e $H=12$.

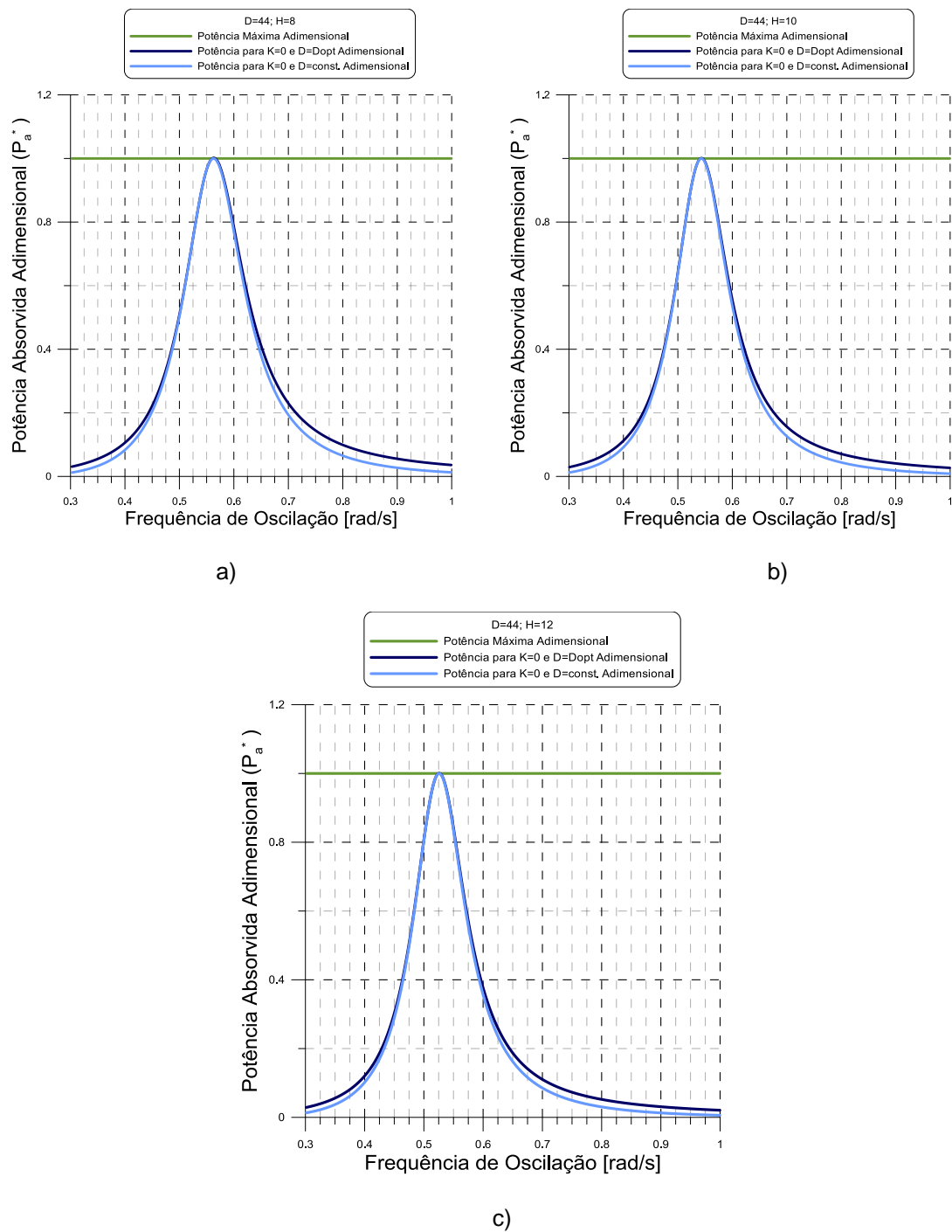


Figura 5.5 - Potência absorvida adimensional em função da frequência de oscilação para os casos 1, 2 e 3. Flutuadores: a) $D=44$ e $H=8$; b) $D=44$ e $H=10$; c) $D=44$ e $H=12$.

Para o caso 1, obtiveram-se valores aproximadamente unitários para a potência adimensional. Este facto permite concluir que o modelo numérico calcula com grande precisão a potência absorvida.

As curvas referentes aos casos 2 e 3 são muito semelhantes e quase coincidentes para uma gama larga de frequências que coincide com a da agitação. Desta forma, conclui-se que na prática não se justifica, a construção de um mecanismo de *PTO* com amortecimento

adaptável à frequência da excitação. Este facto está intimamente relacionado a se ter considerado nula a componente elástica.

Apenas para flutuadores com diâmetros entre 38-44m e alturas entre 8-12m se consegue ajustar a frequência de oscilação para a qual a potência de absorção é máxima, à frequência da agitação marítima. Estes flutuadores são evidentemente de muito grandes dimensões e consequentemente de grande massa. Tal facto deve-se certamente à inexistência de componente elástica ($K_{pto} = 0$) para o sistema em estudo nos casos 2 e 3.

O ajustamento da frequência de oscilação à frequência da agitação marítima é essencial no projecto de um sistema de absorção. Como observado nas figuras 5.3 a 5.5, a potência absorvida apresenta um pico correspondente a uma gama limitada de frequências. Fora desta gama, a potência absorvida é muito pequena inviabilizando a sua rentabilidade.

Para flutuadores com dimensões razoáveis, o pico da potência absorvida corresponde a uma gama de frequências diferente da frequência da agitação marítima. Na figura 5.6 representa-se a potência absorvida adimensional, para um sistema com flutuador de diâmetro 4m e com altura 2m, em função da frequência de oscilação.

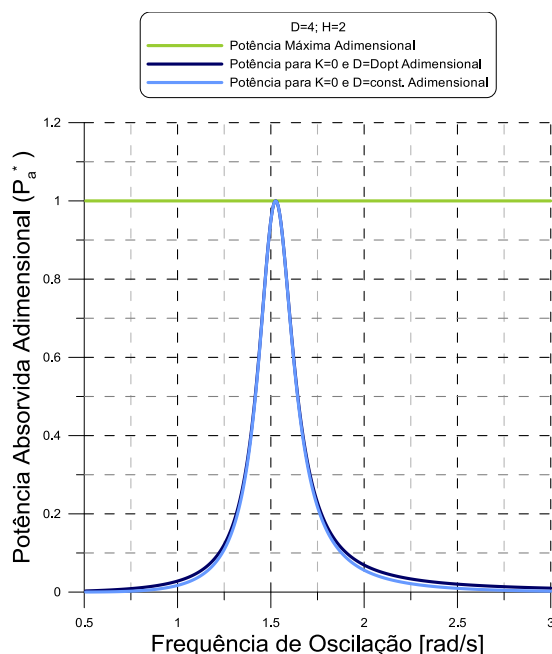


Figura 5.6 - Potência absorvida adimensional em função da frequência de oscilação para os casos 1, 2 e 3 com flutuador de $D=4$ e $H=2$.

Conclui-se que flutuadores desta dimensão são desajustados às características do recurso energético, não sendo rentáveis. Como observado na figura 5.6, a potência absorvida apresenta um pico correspondente a uma gama ainda mais estreita de frequências relativamente aos anteriores.

A estratégia para utilizar flutuadores desta dimensão passa pela utilização de sistemas ainda mais complexos que consigam controlar a fase entre a força de excitação e a velocidade e assim, dotar o sistema de características ressonantes.

Na figura 5.7 representa-se a potência absorvida em função da frequência de oscilação, para um sistema sem componente elástica e amortecimento constante ($D_{PTO} = 5892 \text{ kg/s}$), com um flutuador de diâmetro 4m e com altura 2m.

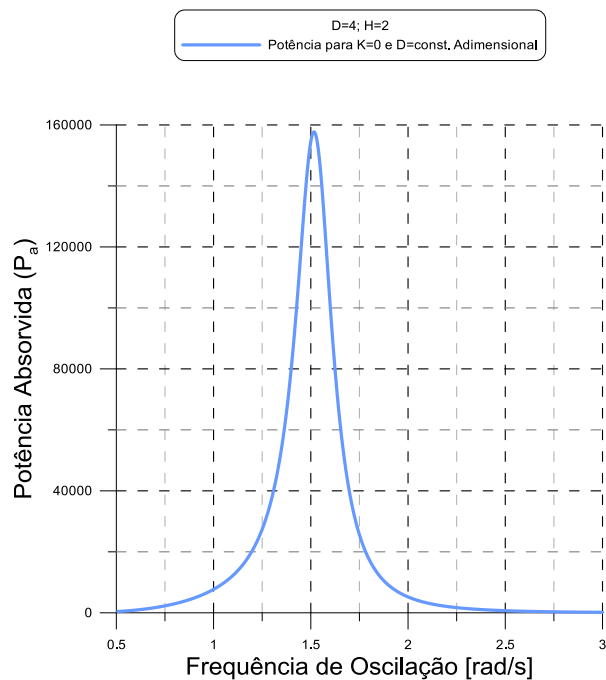


Figura 5.7 - Potência absorvida em função da frequência de oscilação para o caso 3 com flutuador de $D=4$ e $H=2$.

Constata-se então que este sistema absorveria no máximo 160 kW quando exposto a uma onda de aproximadamente 4 segundos e amplitude 1 m. Através da tabela 8 conclui-se ser uma onda sem probabilidade de existência.

Na tabela 9 resumem-se para as frequências de pico as características dinâmicas dos flutuadores e as potências.

<i>Dimensão [m]</i>	ω [rad/s]	A_{33} [kg]	$D_{33} = D_{PTO}$ [kg/s]	F_3^E [N]	ζ_3 [m]	P_E [W]	$P_R = P_A$ [W]	P_{Amax} [W]
<i>D=4; H=2</i>	1,526	11308	5892	85919	4,778	313234	156617	156617
<i>D=38, H=10</i>	0,562	8863525	1954975	6109499	1,858	4704194	2352097	2386602
<i>D=38, H=12</i>	0,544	9100635	1872083	6505371	1,305	5582231	2791115	2825719
<i>D=40, H=8</i>	0,572	9953258	2351223	6226011	0,938	4043612	2021806	2060801
<i>D=40, H=10</i>	0,560	10198074	2246059	6549424	1,167	4774468	2387234	2388044
<i>D=40, H=12</i>	0,535	10535022	2155365	7077768	1,225	5735972	2867986	2905239
<i>D=42, H=8</i>	0,562	11447494	2680172	6771696	0,890	4192521	2096260	2138310
<i>D=42, H=10</i>	0,546	11769349	2565250	7180342	1,056	5004667	2502333	2512294
<i>D=42, H=12</i>	0,527	12109499	2463654	7672228	1,155	5893193	2946596	2986574
<i>D=44, H=8</i>	0,553	13081610	13480065	3035731	0,846	4055665	2027833	2217865
<i>D=44, H=10</i>	0,547	13343462	2905524	7615617	1,076	4972557	2486279	2591069
<i>D=44, H=12</i>	0,519	13830188	2797648	8288686	1,092	6053461	3026731	3069646

Tabela 10 – Frequência de pico, massa adicionada, coeficiente de amortecimento, força de excitação, resposta de amplitude e potências de excitação, radiada e absorvida.

As simulações numéricas permitiram confirmar que, tal como previsto analiticamente na secção 2.3, para sistemas de absorção pontual com apenas um grau de liberdade, arfagem, apenas 50% da energia incidente pode ser absorvida e que os restantes 50% da energia é radiada. Ou seja a potência radiada é igual à potência absorvida, pelo que o estudo hidrodinâmico do flutuador permite aumentar as suas propriedades radiantes e consequentemente a potência extraída.

Estas simulações permitiram verificar ainda que em qualquer situação a potência radiada é igual à potência absorvida.

6 Conclusões e Desenvolvimento Futuro

O modelo desenvolvido foi submetido a dois tipos de testes de validação. Inicialmente para um corpo flutuante livre, tendo posteriormente sido acoplado um sistema de *PTO*. As simulações para o corpo flutuante livre, foram comparadas com resultados experimentais e numéricos publicados na bibliografia. Para além, da coerência do comportamento físico do flutuador, a coincidência entre resultados permitiu concluir que o modelo desenvolvido simula com rigor e precisão a dinâmica dos corpos flutuantes. Para um sistema com *PTO*, não foi possível comparar os resultados obtidos com resultados experimentais. No entanto, obteve-se o valor da potência absorvida através de dois métodos distintos: cálculo analítico (potência máxima) e através da simulação física do sistema, tendo-se obtido valores coerentes e praticamente coincidentes.

Como o principal objectivo desta dissertação era o desenvolvimento de uma ferramenta numérica que permitisse dimensionar sistemas de extracção de energia, o autor considera que este foi obtido com sucesso.

Na prática é tecnologicamente complexo construir um mecanismo de *PTO* capaz de alterar os seus coeficientes elásticos e de amortecimento em função da frequência de excitação. No caso da componente elástica, as condições óptimas implicam não só que dependa da frequência, como que em algumas situações tenha de ser negativo. Na prática, o *PTO* teria de estar dotado de molas e de atuadores. Sendo complicado projectar um sistema deste tipo, neste trabalho, optou-se por considerar um sistema que não tem componente elástica. No que diz respeito ao coeficiente de amortecimento existem geradores lineares que permitem, dentro de gamas restritas, variar as suas características dinâmicas em função da frequência. Assim, optou-se por considerar que o dispositivo poderá variar as suas características de amortecimento com a frequência. Com estas hipóteses, as simulações efectuadas permitiram concluir que, para a gama de frequências de maior absorção de energia, a potência extraída por um sistema de *PTO* com amortecimento variável é muito semelhante à extraída por um sistema com amortecimento constante. Conclui-se então que na prática não se justifica a construção de um mecanismo de *PTO* com amortecimento adaptável à frequência da excitação. Parece assim que a escolha da componente elástica (neste trabalho admitida nula) é mais crítica que a do amortecimento.

O ajustamento da frequência natural do sistema à frequência da agitação marítima é essencial no projecto de um dispositivo de absorção. A potência absorvida por um sistema com sem componente elástica apresenta um pico correspondente a uma gama limitada de frequências. Fora desta gama, a potência absorvida é muito pequena inviabilizando a sua rentabilidade económica. A utilização da ferramenta desenvolvida permitiu determinar que apenas com flutuadores de muito elevada massa se consegue ajustar a frequência de oscilação do sistema, para a qual a potência de absorção é máxima, à frequência da agitação marítima típica da nossa costa.

Desenvolvida e validada uma ferramenta numérica que permite a modelação de um sistema de *PTO*, do tipo de absorção pontual, a principal perspectiva de desenvolvimento futuro consiste no projecto e optimização de um flutuador com dimensões razoáveis. Desta forma, considera-se essencial a introdução de um componente elástico no sistema de *PTO*, o que se traduz num estudo paramétrico de fácil concepção com o modelo desenvolvido. Outra possibilidade de trabalho futuro prende-se com o ajuste da massa do sistema. A introdução de termos cruzados correspondentes ao acoplamento de diferentes graus de liberdade, permite variar a massa adicionada (que pode mesmo assumir valores negativos) e assim, as características ressonantes do sistema. Outra forma de ajustamento da massa oscilante é a

utilização de um dispositivo suspenso. Assim, o peso do flutuador poderia ser diferente do valor da força de impulsão, conferindo uma maior liberdade de projecto.

Como se constatou neste trabalho, a optimização de um flutuador para um sistema de *PTO* deste tipo é um problema complexo. No entanto, a ferramenta desenvolvida permite efectuar estudos que possibilitam identificar a importância de cada um dos parâmetros numa determinada gama de funcionamento.

Não obstante a grande generalidade do modelo desenvolvido, é importante recordar que este é linear, portanto baseado em pequenos deslocamentos. O desenvolvimento deste tipo de modelos lineares foi efectuado pela indústria naval com o objectivo de limitar os movimentos de navios. No caso de extracção de energia, pretende-se que os movimentos sejam ressonantes podendo portanto violar as hipóteses da teoria linear. Note-se que a introdução de um sistema de *PTO* diminui a amplitude destes movimentos. Concluindo, o projecto de um sistema de extracção de energia das ondas utilizando modelos lineares não dispensa a experimentação física ou alternativamente a utilização de modelos numéricos não lineares baseados nas equações de *Navier-Stokes*.

Por fim, do ponto de vista pessoal, este trabalho possibilitou ao autor rectificar deficiências formativas enquanto aluno, nomeadamente na utilização de simulação numérica e na programação de nível científico.

Bibliografia

- [1] Andrews, J. and Jelley, N., "*Energy Science: Principles, Technologies and Impact*", Oxford, 2007.
- [2] Vaz, D. C., "*Sebenta de Energia e Ambiente*", Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNL, 2012.
- [3] C. R. E. S., "*European Thematic Network on Wave Energy, Wave energy utilization in Europe, Current Status and Perspective*", Greece, 2002.
- [4] Cruz, J. B. P. e Sarmento, J. N. A., "*Energia das Ondas*", 2004.
- [5] Barreiro, T. G., Gil, L. C., "*Energia das ondas Marítimas: Tecnologias e a Experiência Portuguesa, Anais do Clube Militar Naval*", 2008.
- [6] W. E. C. e C. E. O., "*Potencial e estratégia de desenvolvimento da energia das ondas em Portugal*", 2004.
- [7] Sítio na internet: <http://www.maritimejournal.com>.
- [8] Méhauté, B. L., "*Hydrodynamics and Water Waves*", 1976.
- [9] J. A. Santos, "*Modelo Numérico do Comportamento de Navios Amarrado*", APMTAC, Portugal: LNEC, 2006.
- [10] Falnes, J., "*Ocean Waves and Oscillating System*", Cambridge, 2002.
- [11] Fonseca, N., "*Hidrodinâmica dos movimentos e esforços induzidos em navios por ondas de grande amplitude*", PhD Tese, Universidade Técnica de Lisboa - IST, 200
- [12] Ponte, J. A., "*Desenvolvimento de um novo sistema de aproveitamento de energia das ondas*", IST, 2012.
- [13] M. I. T., "*User Manual WAMIT*", 2006
- [14] Paredes, P. G., "*Estudo Experimental do Flutuador de um Sistema Offshore de Energia das Ondas*", FEUP, ISBN, 2008.
- [15] Sítio na internet: <http://www.hidrografico.pt/>
- [16] **Sarmentodsfsklfds**

